



L'analyse ergonomique des besoins en amont de la conception de technologies émergente: le cas de la Réalité Augmentée pour la formation à la maintenance automobile

Margarita Anastassova

► To cite this version:

Margarita Anastassova. L'analyse ergonomique des besoins en amont de la conception de technologies émergente: le cas de la Réalité Augmentée pour la formation à la maintenance automobile. Psychologie. Université René Descartes - Paris V, 2006. Français. NNT: . tel-00340103

HAL Id: tel-00340103

<https://theses.hal.science/tel-00340103>

Submitted on 19 Nov 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université René Descartes – Paris 5
Unité Ergonomie – Comportement &
Interactions EA 4070
45 rue des Saints-Pères
75270 Paris Cedex 06



CEA – LIST
18, route du Panorama
92265 Fontenay-aux-Roses Cedex

École doctorale « Cognition, comportement, conduites humaines » (ED 261)

Thèse présentée pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université René Descartes - Paris 5

Discipline : Psychologie – Ergonomie Cognitive

**L'analyse ergonomique des besoins
en amont de la conception de technologies émergentes**

**Le cas de la Réalité Augmentée
pour la formation à la maintenance automobile**

Margarita Anastassova

Soutenance le 13 décembre 2006

Composition du jury :

Pierre Falzon, Professeur, CNAM (Rapporteur)
Éric Brangier, Professeur, Université de Metz (Rapporteur)
Jean-Marc Labat, Professeur, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)
Jean-Marie Burkhardt, Maître de Conférences, Université Paris 5, Tuteur
Christine Mégard, Ingénieur de Recherche, CEA – LIST
Jean-Claude Sperandio, Professeur Émérite, Université Paris 5, Directeur de la thèse

REMERCIEMENTS

Je remercie sincèrement M. Jean-Claude Sperandio, Professeur Émérite à l'Université Paris V, de m'avoir proposé cette thèse. Merci aussi pour sa confiance, son encouragement, ses conseils et ses suggestions, ainsi que pour ses nombreuses relectures du texte.

Je remercie tout particulièrement M. Jean-Marie Burkhardt, Maître de Conférences à l'Unité Ergonomie – Comportement & Interactions de l'Université Paris V, pour ses nombreux conseils, son soutien pendant toutes ces années, sa disponibilité, son écoute et ses relectures de ce texte. Merci aussi de m'avoir toujours soutenue, aidée et encouragée à publier.

Mes sincères remerciements à M. Pierre Falzon, Professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers et Directeur du Laboratoire d'Ergonomie, et à M. Éric Brangier, Professeur à l'Université de Metz et Directeur de l'Équipe Transdisciplinaire sur l'Interaction et la Cognition, d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Merci également à M. Jean-Marc Labat, Professeur à l'Université Paris 6 et Directeur du Centre de l'Usage des Technologies Éducatives en Sciences, d'avoir accepté de participer au jury et d'avoir consacré une partie de son temps à la relecture de cette thèse.

Merci à Mme Christine Mégard, Ingénieur de recherche au Laboratoire d'Interfaces Sensorielles au CEA-LIST, de m'avoir introduite au sein de l'équipe, des discussions toujours enrichissantes, des relectures de ce textes et des articles, ainsi que de son encadrement attentif.

Merci à M. Arnould Leservot, Chef du Service Réalité Virtuelle, Cognitive et Interfaces Sensorielles (SRCI) et à M. Moustapha Hafez, Chef du Laboratoire Interfaces Sensorielles (LIS) au CEA, de m'avoir accueillie dans leurs structures respectives et de l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Merci à M. Pierre Ehanho, spécialiste des technologies et des solutions métiers à Renault S.A.S., M. Dominique Dionnet et M. Patrice Moraglia, successivement Responsables du Centre de Formation de Renault à Paris, de leur intérêt pour cette recherche. Merci aussi de m'avoir donné un accès au terrain.

Un grand merci à tous les mécaniciens, les concepteurs de formation et les formateurs d'avoir participé volontiers à cette recherche et de m'avoir accueillie en atelier et au centre de formation. Sans leur aide, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail.

Merci aussi à tous les membres des séminaires de l'Unité d'Ergonomie de l'Université Paris 5 et de l'équipe « Ergonomie et Conception » CNAM – INRIA de leurs conseils très utiles lors de mes présentations.

Merci à mes collègues du LIS – CEA des moments de détente lors des pauses café.

Merci enfin à mon mari de sa patience, de son écoute, de sa compréhension et de ses relectures. Informaticien, il est du moins sensibilisé à l'ergonomie...

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION : CONTEXTE INDUSTRIEL ET PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DE LA THÈSE	7
1. CONTEXTE INDUSTRIEL ET DEMANDE EXPRIMÉE	7
2. PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE	8
3. ORGANISATION DU DOCUMENT	9
 CHAPITRE 1 : LA RÉALITÉ AUGMENTÉE : PRÉSENTATION INTRODUCTIVE	 11
1.1. CONCEPTS ET DÉFINITIONS	11
1.2. CONFIGURATION MATÉRIELLE TYPIQUE DES PROTOTYPES DE RÉALITÉ AUGMENTÉE EXISTANTS	15
1.3. MODALITÉS SENSORIELLES AUGMENTÉES PAR LES PROTOTYPES DE RA EXISTANTS	16
1.4. LA RA : UNE TECHNOLOGIE ÉMERGENTE	17
 CHAPITRE 2 : RÉALITÉ AUGMENTÉE ET FORMATION : UNE POINT SUR LES CONNAISSANCES ERGONOMIQUES ACTUELLES	 20
2.1. OBJECTIFS DE FORMATION ET CONTEXTES D'USAGE DES PROTOTYPES DE RA EXISTANTS	20
2.2. MÉTHODE PÉDAGOGIQUE PRIVILÉGIÉE ET PROFILS DES UTILISATEURS CIBLÉS PAR LES PROTOTYPES DE RA EXISTANTS	25
2.3. INTÉRÊTS DE LA RA POUR LA FORMATION ET L'APPRENTISSAGE	26
2.4. ÉVALUATIONS EMPIRIQUES DE L'UTILISABILITÉ ET DE L'UTILITÉ DE LA RA POUR L'APPRENTISSAGE	28
CONCLUSION	38
 CHAPITRE 3 : BESOINS D'ANALYSES ERGONOMIQUES DANS LE DOMAINE DES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES	 48
INTRODUCTION	48
3.1. PRINCIPAUX INTÉRÊTS DE L'ANALYSE ERGONOMIQUE DANS LE DOMAINE DES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES	48

3.2. L'ANALYSE DES BESOINS ERGONOMIQUE : UNE APPROCHE DE LA CONCEPTION DE TECHNOLOGIES ÉMERGENTES QUI RESTE MINORITAIRE	50
3.3. MÉTHODES UTILISÉES POUR L'ANALYSE ERGONOMIQUE DES BESOINS DE TECHNOLOGIES ÉMERGENTES	52
3.4. PRINCIPAUX CADRES THÉORIQUES	61
CONCLUSION : NÉCESSITÉ DE TRIANGULATION DES MÉTHODES ET DES CADRES THÉORIQUES	65

CHAPITRE 4 : L'ANALYSE DES BESOINS AU MOYEN D'ENTRETIENS AVEC LES FUTURS UTILISATEURS DANS LE CONTEXTE DE LA MAINTENANCE AUTOMOBILE

66

INTRODUCTION	66
4.1. ÉTUDE 1 : ENTRETIENS AVEC DES TECHNICIENS EN MAINTENANCE AUTOMOBILE	70
4.1.1. MÉTHODOLOGIE	71
4.1.2. RÉSULTATS	79
4.1.3. LIMITES DE L'ÉTUDE	88
4.1.4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	88
4.2. ÉTUDE 2 : ENTRETIENS AVEC DES ACTEURS DE LA FORMATION	90
4.2.1. MÉTHODOLOGIE	93
4.2.2. RÉSULTATS	97
4.2.3. LIMITES DE L'ÉTUDE	106
4.2.4. DISCUSSION SUR L'ACTIVITÉ DES ACTEURS DE FORMATION DANS LE CONTEXTE DES ÉVOLUTIONS DE LA CONCEPTION DE VÉHICULES ET APPLICATIONS POSSIBLES DE LA RA	106
4.2.5. CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES	109

CHAPITRE 5 : L'ANALYSE DES BESOINS PAR L'OBSERVATION DE L'ACTIVITÉ EN SITUATION DE FORMATION

112

INTRODUCTION	112
5.1. MÉTHODOLOGIE	113
5.2. RÉSULTATS	122
5.3. LIMITES DE L'ÉTUDE	131
5.4. DISCUSSION SUR L'ACTIVITÉ DE FORMATION DANS LE CONTEXTE DES ÉVOLUTIONS DE LA CONCEPTION DE VÉHICULES ET APPLICATIONS POSSIBLES DE LA RA	131
5.5. CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES ET PERSPECTIVES	133

CHAPITRE 6 : L'ANALYSE DES BESOINS AU MOYEN DE L'ÉVALUATION D'UN PROTOTYPE	136
INTRODUCTION	136
6.1. OBJECTIF DE L'ÉTUDE ET QUESTIONS DE RECHERCHE	138
6.2. MÉTHODOLOGIE	138
6.3. RÉSULTATS	143
6.4. LIMITES DE L'ÉTUDE	145
6.5. DISCUSSION	146
6.6. CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES ET PERSPECTIVES	147
CONCLUSION GÉNÉRALE	153
BIBLIOGRAPHIE	160

Introduction

Contexte industriel et problématique générale de la thèse

1. Contexte industriel et demande exprimée

Les études ergonomiques, présentées dans cette thèse, portent sur l'analyse des besoins en amont de la conception d'une technologie émergente, à savoir la Réalité Augmentée (RA). L'emploi de cette technologie est ici destiné aux techniciens et aux formateurs en maintenance automobile, confrontés à diverses difficultés dans les conditions actuelles de conception et de production de véhicules. La demande à l'origine de ces études, centrée d'emblée sur une assistance technologique au moyen de la RA, a été formulée par Renault S.A.S en tant que futur utilisateur du système et par le Service Réalité Virtuelle, Cognitique et Interfaces (SRCI) du Laboratoire d'Intégration des Systèmes et des Technologies du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA-LIST) en tant que concepteur. C'est dans ce cadre professionnel que cette thèse a été réalisée.

La demande de Renault, exprimée initialement, évoquait des difficultés rencontrées par des techniciens en atelier pour accéder en temps réel aux informations pertinentes pour le montage / démontage de pièces sur les nouveaux modèles de véhicules. Les demandeurs des études expliquaient ces problèmes par une mauvaise visibilité de certaines pièces, une méconnaissance de leur emplacement, des incertitudes des mécaniciens quant aux opérations à réaliser et aux trajectoires de montage / démontage, etc. Toutes ces difficultés s'inscrivaient dans le contexte plus général, hautement évolutif et concurrentiel, de la conception et de la maintenance de véhicules automobiles, qui, actuellement, est marquée par un ensemble de transformations :

- La réduction du cycle de conception de 3 – 4 ans à 18 – 20 mois.
- Une conception de plus en plus "distribuée", incluant un grand nombre de sous-traitants.
- Le raccourcissement de la durée des sessions de formation des mécaniciens et une tendance à laisser la formation se faire sur le tas.

- La complexification des véhicules, contenant actuellement 4 à 5 fois plus de modules fonctionnels que leurs prédécesseurs de dix ans auparavant.
- L'introduction massive de composants électroniques, dont le nombre est environ dix fois plus élevé qu'au début des années 1990.
- L'introduction de réseaux informatiques locaux dans le véhicule.
- La diversité et le manque de standardisation des composants électroniques.
- Le renouvellement rapide de la gamme de véhicules et des supports de maintenance associés : outils d'aide au diagnostic, manuels de réparation, etc.
- La suppression progressive des prototypes physiques d'étude.

Ces évolutions introduisent de nouvelles contraintes dans l'activité des opérateurs de maintenance et de même que dans celle de la formation à cette maintenance. Une des principales directions pour atténuer les effets négatifs de ces contraintes est l'introduction d'aides technologiques. Ce fait explique, en partie, la nature de la demande initiale mettant explicitement l'accent sur l'utilisation de la RA comme moyen d'assistance. Cependant, à cause du caractère novateur de cette technologie, les intérêts et les utilisations possibles dans le domaine de la maintenance automobile étaient initialement peu définis par Renault. Les demandeurs des études faisaient plusieurs hypothèses en ce sens : aide à la formation, aide au suivi de procédure, aide au diagnostic, etc., mais aucune donnée, compte tenu des évolutions du contexte industriel, ne permettait à la fois de les préciser et de les évaluer a priori en définissant des scénarios d'utilisation adaptés.

2. Problématique de la thèse

En réponse à la demande exprimée, nous avons orienté nos recherches vers :

- **Une analyse de l'impact des évolutions récentes de la conception et de la production de véhicules sur l'activité des techniciens et des formateurs en maintenance automobile.** Cette problématique de recherche est rarement abordée en tant que telle dans la littérature ergonomique, notamment par le biais d'études empiriques. De plus, cette orientation nous permettait, d'un point

de vue applicatif, de cerner les besoins des futurs utilisateurs en vue du choix et de l'optimisation des fonctionnalités du système de RA.

- **Une analyse des intérêts et des limites de la RA pour la maintenance et la formation à cette maintenance, ainsi que des applications de prototypes existants dans des contextes similaires.** La littérature est également très lacunaire sur ces points. A notre connaissance, il n'existe pas une synthèse bibliographique sur l'ergonomie de la RA pour la formation. Dans la majorité des cas, les connaissances ergonomiques sont dispersées dans des articles dont l'objectif principal est la présentation d'une innovation technologique dans le domaine de la RA.
- **Une évaluation des méthodes et des techniques d'analyse des besoins pour des technologies très innovantes telles que la RA.** L'utilisabilité des prototypes de RA existants est abordée dans la littérature ergonomique spécialisée, mais peu d'études abordent les problèmes des méthodes et des techniques se centrant sur l'utilité des futurs dispositifs. C'est pourtant un point clé pour l'application d'une technologie émergente dans un contexte industriel. Or, comme nous le montrerons, l'application de méthodes classiques d'évaluation de ces besoins ne donne pas toujours les résultats attendus quand il s'agit de technologies encore peu connues par leurs futurs utilisateurs.

3. Organisation du document

Le premier chapitre de la thèse expose brièvement le concept de RA et ses caractéristiques qui nous permettent de définir cette technologie comme émergente. Dans le deuxième chapitre, nous présentons un état de l'art sur l'ergonomie de la RA pour la maintenance et la formation. Le chapitre 3 introduit la problématique et la nécessité d'analyser les besoins des futurs utilisateurs lors de la conception de technologies émergentes telles que la RA. Nous présentons les méthodes utilisées pour l'analyse des besoins, ainsi que certaines de leurs avantages et leurs limites quand il s'agit de technologies innovantes. Le chapitre 4 présente deux recherches, qui ont en commun l'utilisation d'une même méthode de recueil des données, à savoir des entretiens semi-dirigés. Réalisés avec des techniciens, des formateurs et des concepteurs de formations dans le domaine de la maintenance automobile, ces entretiens avaient un triple objectif.

D'abord, ils devaient nous permettre d'analyser les difficultés de ces opérateurs dans le contexte des dernières évolutions de la conception automobile. Nous voulions également cerner rapidement leurs besoins éventuels d'une future assistance en RA. Enfin, nous voulions mettre en évidence certains avantages et limites des entretiens comme méthode d'analyse des besoins en amont de la conception de technologies émergentes. Le chapitre 5 présente une analyse des besoins des futurs utilisateurs, réalisée par l'observation de l'activité en situation de formation. L'objectif de cette analyse était de compléter et donner une valeur « objective » des données obtenues à partir des entretiens. Le chapitre 6 présente une évaluation ergonomique d'un prototype de RA d'aide à la maintenance de trains. Au-delà de l'objectif de l'évaluation ergonomique en tant que telle, cette étude devait nous permettre de réfléchir aux apports et aux limites des tests avec des utilisateurs, quand ces derniers servent à générer de nouveaux besoins. Enfin, dans la dernière partie de la thèse, nous présentons une discussion des résultats.

Chapitre 1

La Réalité Augmentée : présentation introductive¹

1.1. Concepts et définitions

Le terme *Réalité Augmentée* (RA) a été introduit au début des années 1990 (Caudell & Mizell, 1992) afin de désigner des systèmes interactifs caractérisés par la présentation combinée et en temps réel d'entités virtuelles (c'est-à-dire générées par un ordinateur) et d'éléments physiques de l'environnement réel (Azuma, 1997 ; Caudell *et al.*, op. cit.). Un exemple de vue « augmentée », associant des images d'objets physiques réels (le capot ouvert d'une voiture) et des éléments virtuels (les instructions de démontage du dispositif d'injection), est présentée ci-dessous (fig. 1). L'objectif explicite de l'augmentation est ici le guidage de l'opérateur pendant la réalisation de la tâche de démontage (Dangelmaier *et al.*, 2005).



Fig. 1. Vue « augmentée » d'un système d'injection réel et des instructions de démontage virtuelles (d'après Dangelmaier *et al.*, 2005)

¹ Ce chapitre ainsi que le chapitre suivant ont donné lieu à une publication (Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, sous presse).

Cet exemple illustre l'idée que la RA implique une relation sémantique entre les scènes réelles et les entités virtuelles (Fuchs, Moreau & Papin, 2001). La notion d'augmentation fait référence à l'enrichissement que l'on attend de l'information véhiculée par les objets virtuels, en complément des informations directement offertes par des images classiques du monde réel. Du moins, fait-on l'hypothèse qu'il y a bien enrichissement.

L'hypothèse d'enrichissement de la réalité, bien que particulièrement attirante dans une perspective d'aide à l'utilisateur, ne constitue pas un point clé dans toutes les définitions du concept de RA. D'autres interprétations insistent plus sur les caractéristiques graphiques des interfaces. Ainsi, Azuma (1997 ; Azuma *et al.*, 2001), dont la définition a une valeur de référence dans le domaine, caractérise les systèmes de RA par les propriétés suivantes :

- intégration « transparente » d'entités virtuelles en *trois dimensions* dans un espace réel également en *trois dimensions* afin que l'utilisateur ne puisse pas distinguer les deux types d'environnement ;
- interactivité en temps réel ;
- disposition des objets virtuels et réels de façon cohérente les uns par rapport aux autres (notion de recalage², « registration »).

D'un point de vue ergonomique, une telle interprétation est discutable sur au moins deux points. Premièrement pour la réalisation de nombreuses tâches de montage / démontage, par exemple, la présentation de l'information en deux dimensions pourrait être suffisante. Le prototype d'aide au montage / démontage de l'injection, qui a été présenté plus haut, appuie cette position. Deuxièmement dans d'autres cas, le recalage précis ne semble pas une exigence. Ainsi, dans certaines applications de formation, il s'agit de présenter une consigne ou une information utile pour le rappel, alors que la zone réelle concernée par l'action est aisément identifiable par ailleurs.

² Le recalage, qui reste encore un verrou technologique important, vise à faire coïncider visuellement, haptiquement ou auditivement les objets du monde réel aux enrichissements qui leur sont associés. Le challenge technique est de réduire au maximum le décalage perçu par l'utilisateur. Les sources de ce décalage sont des délais dus à la fréquence d'échantillonnage du système de mesure du mouvement, des délais de transmission des données entre les différents dispositifs, des temps de calculs relativement longs, etc. (Mestre, 2004).

Critiquable d'un point de vue lexical et conceptuel, le terme « RA » a été progressivement précisé, étendu ou remplacé par une multitude d'autres dénominations telles que « réalité mixte » et « virtualité augmentée » (Drasic & Milgram, 1996). Mais notre objectif n'est pas de présenter une discussion sur les différentes dénominations et les définitions qui les concernent. C'est pourquoi nous nous limiterons à noter que tous ces termes introduisent des nuances relatives aux composants technologiques mélangeant le virtuel et le réel ou aux rapports entre les deux types d'environnement. Les différences et les similitudes entre tous ces concepts sont résumées par le diagramme de Milgram & Kishino, (1994, fig. 2).

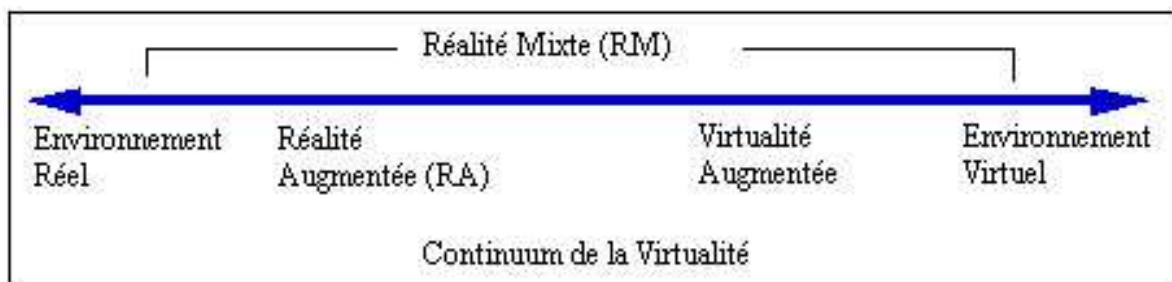
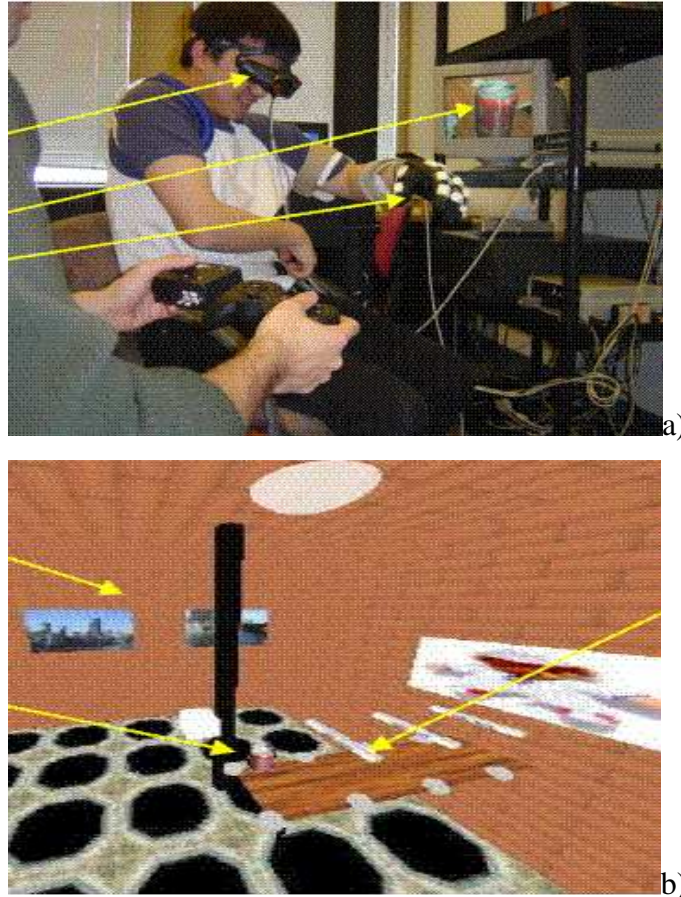


Fig. 2. Le continuum réel - virtuel (d'après Milgram et al., op.cit.)

A l'une des deux extrémités est placé l'environnement réel tel qu'il est perçu par un utilisateur non outillé, sans ajout d'informations virtuelles, tandis qu'à l'autre extrémité se situe l'environnement purement artificiel, c'est-à-dire simulé, généré et présenté par un ordinateur. Cette extrémité est appelée *Réalité Virtuelle* (RV). L'espace entre les deux extrémités est occupé par la *Réalité Mixte* (RM) qui concerne tout type de fusion entre le réel et le virtuel et qui, à la différence de la RV, ne vise pas une substitution complète du monde réel par une simulation artificielle. La *Réalité Mixte* englobe la *Réalité Augmentée* (le cas où l'environnement réel est enrichi par des éléments virtuels) et la *Virtualité Augmentée* (cas particulier où l'interaction avec un monde numérique est enrichie par des objets réels).

Un prototype d'aide à la rééducation des doigts, développé par l'Université d'Illinois à Chicago, pourrait être donné comme exemple de technologie de *Virtualité Augmentée*. Destiné à des victimes d'accidents vasculaires cérébraux, ce dispositif est composé d'un visiocasque, d'un appareil pour étendre le doigt (une orthèse) et d'une unité centrale (Luo, Kenyon, & Kamper, 2006, fig. 3a). Dans son visiocasque, le patient voit les objets virtuels à saisir, un certain nombre de repères virtuels (fig. 3b) ainsi que les mouvements de sa main réelle. Ici, il s'agit bien d'une scène purement virtuelle,

« augmentée » par la vue d'une main réelle. En utilisant cette information visuelle et l'assistance dynamique fournie par l'orthose, l'utilisateur peut réapprendre les gestes de préhension, rendus difficiles par la maladie.



*Fig. 3 a) Le système d'aide à la rééducation des doigts
b) L'interface utilisateur (d'après Luo et al., 2006)*

L'idée d'un continuum de Milgram & *et al.* (1994) est intéressante à double titre. Premièrement, elle montre que les frontières entre les différentes technologies constituant le continuum ne sont guère rigides. Deuxièmement, elle suggère implicitement que certaines conclusions des études ergonomiques concernant une technologie donnée pourraient être transposées à la conception et à l'évaluation d'une autre technologie similaire ou voisine.

Partant de cette position, nous utilisons le terme RA pour tout système qui combine des éléments réels et virtuels sémantiquement liés en temps réel. La préférence pour ce terme est due au fait que, d'une part, cette dénomination est la plus souvent utilisée dans la littérature et a donc un pouvoir évocateur sur un nombre relativement large de lecteurs.

D'autre part, comme souligné plus haut, ce terme insiste fortement sur l'idée d'enrichissement des ressources du sujet.

1.2. Configuration matérielle typique des prototypes de Réalité Augmentée existants

En général, dans les systèmes de RA, la fusion du réel et du virtuel est réalisée grâce à une configuration matérielle typique comprenant trois parties différentes :

- **des dispositifs de présentation de l'information** : des visiocasques, des Tablet PC, des assistants personnels, des téléphones mobiles, des écrans conventionnels plus ou moins larges ;
- **des dispositifs d'entrée d'information** : des capteurs de position, de gestes, de mouvements ; des caméras ; des technologies haptiques et /ou tactiles ; des dispositifs plus traditionnels tels que des stylets, des souris³ ;
- **une unité centrale portable ou fixe.**

Cette configuration matérielle pourrait être illustrée par l'architecture d'un des premiers prototypes de RA, le système MARS (Mobile Augmented Reality System, Höllerer, Feiner, Terauchi, Rashid, & Hallaway, 1999, cf. fig. 4a). L'utilisateur dispose d'un dispositif de visualisation sous forme de visiocasque avec une mini caméra qui filme l'environnement réel. Il est en outre équipé de capteurs de position, notamment un appareil GPS (Global Positioning System), afin de renseigner le système sur sa localisation. L'entrée de données s'effectue à l'aide d'un stylet et grâce aux informations transmises par les capteurs. L'ensemble des données est traité par un ordinateur central (portable sur le dos de l'utilisateur) qui, de plus, génère les entités virtuelles et les superpose aux images filmées en temps réel (fig. 4b). MARS vise l'assistance aux déplacements dans un environnement connu par le système, mais peu connu par l'utilisateur (un campus universitaire, en l'occurrence).

³ Les dispositifs d'interaction utilisés sont très variés, plus ou moins classiques ou innovants (pour plus de détails, voir Bimber & Raskar, 2006 ; Fuchs & Moreau, 2003 ; Tison, Scapin, & Carbonell, 2003).

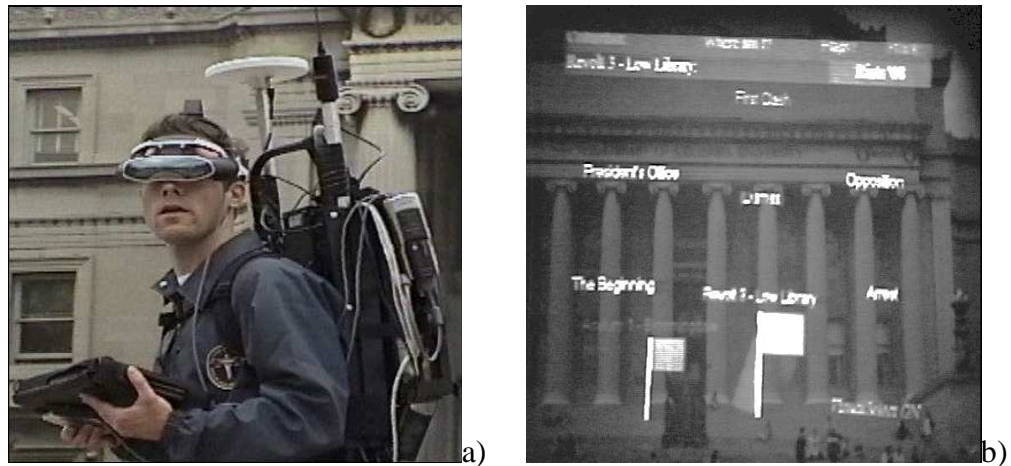


Fig. 4. a) Le prototype MARS

b) La vue devant les yeux de l'utilisateur (d'après Höllerer et al., 1999)

Comme la majorité des systèmes de RA existants aujourd'hui, MARS est un dispositif expérimental avec des fonctionnalités limitées de type sélection de menus et d'objets par des mouvements de la tête (Höllerer et al., 1999). Aussi, les aspects concernant l'application du dispositif sont principalement abordés dans le cadre de scénarios d'utilisation et non pas dans une situation réelle. Nous pouvons raisonnablement espérer qu'avec l'avancement de la technologie, les fonctionnalités proposées à l'utilisateur seront plus nombreuses, plus variées et plus utiles pour des tâches spécifiques.

1.3. Modalités sensorielles augmentées par les prototypes de RA existants

Les exemples cités précédemment montrent que les entités virtuelles générées par les prototypes de RA sont aujourd'hui essentiellement des icônes, des images de synthèse plus complexes ou du texte. Les dispositifs actuels proposent principalement une « augmentation » visuelle, mais il existe également des tentatives d'augmentation auditive (RA audio), haptique (RA haptique) et, logiquement, multisensorielle (RA multimodale). Les dispositifs de RA audio génèrent des sons synthétisés qui complètent ou recouvrent des sons émanant de l'environnement réel de l'utilisateur (Cohen, Aoki, & Koizumi, 1993). Les sons, généralement en trois dimensions (3D), sont présentés d'une manière indépendante (par exemple, Mynatt, Back, Want, & Fredercick, 1997) ou en combinaison avec des éléments virtuels graphiques (par exemple, Lawson & Nutter, 2005 ; Zhou, Cheok, Yang, & Qiu, 2004). Dans ce deuxième cas, il s'agit d'un dispositif de RA

multimodale. Les prototypes de RA audio et multimodale (audition/vision) visent, par exemple, l'assistance à la localisation et aux déplacements de personnes malvoyantes ou aveugles (Cohen, 1994).

Quant aux prototypes de RA haptique, ils ont pour but de renforcer la sensibilité cutanée et/ou kinesthésique au moyen d'un retour tactile et/ou d'effort « virtuel », perçu à l'aide d'un gant de données ou d'un bras robotisé (Adcock, Hutchins, & Gunn, 2004 ; Borst & Volz, 2005). La figure 5 présente un tel dispositif.



Fig. 5. Système de RA haptique (d'après Adcock et al., 2005)

Comme les systèmes de RA audio, les dispositifs de RA haptique associent souvent augmentation haptique et visuelle (fig. 5). Les concepteurs de ces systèmes les considèrent comme potentiellement utiles pour le design de différents objets et la formation à des gestes et à des mouvements précis.

1.4. La RA : une technologie émergente

Avec d'autres technologies récentes (micro- et nanotechnologies, réalité virtuelle, etc.), la RA constitue un exemple de technologie émergente (Kjeldskov, 2003). De façon générale, les technologies émergentes se caractérisent, selon Kjeldskov (op. cit.), par :

- **Un caractère novateur, une avancée technologique importante, partiellement réalisée ou en devenir.** Dans le cas de la RA, de telles avancées

technologiques majeures sont réalisées grâce notamment aux recherches sur le recalage. Elles concernent la conception de capteurs d'informations suffisamment précis, réactifs et robustes et de nombreux dispositifs d'interaction et de traitement de données, petits et légers, mais dotés d'une grande capacité de calcul et de stockage et d'une bonne qualité d'affichage, en termes de résolution, taux de rafraîchissement, champ de vision, etc. (Azuma, 1997 ; Azuma *et al.*, 2001).

- **Des usages peu clairs et peu différenciés** (Roberts, 2002). Pour les prototypes de RA existants, deux usages principaux sont envisagés. Ce sont l'aide au suivi de procédures et la formation, d'ailleurs souvent implantés dans un même système. Ces deux applications de la RA se retrouvent dans de nombreux secteurs économiques : médecine (Bajura, Fuchs, & Ohbuchi, 1992), industrie (Schwald & Laval, 2003), défense (ex. : Kirkley *et al.*, 2002), architecture (Aliakseyeu, Martens, & Rauterberg, 2006), jeux (Wagner & Schmalstieg, 2006), etc.
- **Plusieurs limites qui en ralentissent l'application massive.** Nous considérons que certaines limites déjà mentionnées à propos des technologies de RV sont aujourd'hui valables pour les technologies de RA. Concernant les systèmes de RV actuellement disponibles, Wilson, Eastgate, & D'Cruz (2002) et Wilson & D'Cruz (2006) dans un article plus récent, identifient cinq types de limites : *techniques* (relatives, par exemple, à l'intégration avec d'autres technologies) ; *d'utilisabilité* (la nature non intuitive d'une grande partie des interfaces matérielles et logicielles) ; *d'application* (le nombre limité de systèmes fonctionnels, utilisés dans des situations réelles de travail) ; *d'évaluation* (l'insuffisance de données empiriques sur la plus-value des technologies de RV dans divers contextes applicatifs) ; *méthodologiques* (le manque d'une méthodologie structurée pour analyser d'éventuels besoins de RV et pour évaluer des solutions proposées ou déjà disponibles sur le marché). Nous considérons que ces limites sont également caractéristiques des technologies de RA aujourd'hui.
- **Une promesse de transformation du contexte économique et social, dans lequel elle sera introduite** (Technology Review, 2004). Dans le cas de la RA,

les transformations sociétales attendues seront provoquées par la capacité qu'a cette technologie de fournir des informations contextualisées, accessibles à tout moment, partout et à l'aide de toutes les modalités sensorielles (Azuma, 1997 ; Neumann & Majoros, 1998). C'est pourquoi Azuma (op.cit.), en empruntant un terme de Brooks (1996), parle de la RA comme d'un exemple typique d'outil informatique servant à « amplifier l'intelligence humaine ». C'est une belle image et...un rêve comme il n'en manque pas dans les milieux de l'Intelligence Artificielle !

Chapitre 2

Réalité Augmentée et formation : une point sur les connaissances ergonomiques actuelles

Comme mentionné plus haut, la formation est l'un des deux domaines d'application privilégiés de la RA. Des prototypes destinés à cet usage, bien que peu nombreux, existent. Ils se différencient à la fois par les dispositifs d'interaction utilisés et par les objectifs de formation implantés.

2.1. Objectifs de formation et contextes d'usage des prototypes de RA existants

La revue de la littérature nous permet de distinguer cinq groupes d'objectifs de formation, implantés dans les prototypes de RA, proposés actuellement. Ces cinq groupes sont les suivants : apprentissage de procédures, avec ou sans expert ; apprentissage de gestes précis ; visualisation et manipulation de mondes physiques inaccessibles ; introduction d'éléments ludiques afin de faciliter l'acquisition d'informations complexes ; aide à l'animation de cours. Certaines applications remplissent simultanément plusieurs objectifs de formation. Nous décrivons ci-après les configurations et les caractéristiques matérielles des différents systèmes.

Apprentissage de procédures avec ou sans expert

Un des objectifs de formation, implantés le plus souvent dans les prototypes de RA, est l'apprentissage rapide de procédures, notamment directement sur le poste de travail. Cet apprentissage peut être réalisé d'une manière autonome ou en communication avec un expert de la tâche. Les applications réalisées dans cette catégorie visent la formation professionnelle à la maintenance industrielle (Zhong, Liu, Georganas, & Boulanger, 2003), à l'assemblage (Boud, Haniff, Baber, & Steiner, 1999) et l'entraînement militaire (Brown *et al.*, 2004 ; Kirkley *et al.*, 2002).

Ainsi, l'objectif du prototype BARS (Battlefield Augmented Reality System), utilisable en temps réel pendant des exercices militaires en ville, est d'enrichir la perception de l'apprenant avec des informations virtuelles sur les forces amies et ennemies cachées, les dangers potentiels, etc., tout en préservant « l'authenticité » d'un entraînement sur un terrain urbain réel (Brown *et al.*, 2004). De la même manière, un système destiné à la maintenance industrielle affiche devant les yeux de l'utilisateur des éléments invisibles par un opérateur non outillé, en particulier des instructions de montage / démontage (Schwald & De Laval, 2003). La conception du prototype est motivée par le fait que la maintenance d'équipements industriels devient de plus en plus complexe, tandis que les sessions de formation diminuent en nombre et en durée.

Les prototypes d'aide à l'apprentissage de procédures sont, le plus souvent, des dispositifs portables avec des visiocasques. Cette configuration matérielle est explicable par la nature des tâches à apprendre, notamment les exigences de mobilité, et la nécessité de fournir rapidement une information contextualisée à l'apprenant. Cependant, à cause de cette dernière caractéristique, ces prototypes se présentent davantage comme une aide à l'exécution de procédures que comme de vrais systèmes implantant une méthode et des objectifs pédagogiques. Les objectifs d'assistance et de formation sont généralement confondus implicitement, alors qu'ils relèvent de processus, de tâches et d'activités mentales assez différents. Il est peu probable qu'une même fonctionnalité de l'outil puisse répondre à des besoins et des exigences de situations aussi disparates. A titre illustratif, le simple affichage d'une procédure (comme celle présentée dans la fig. 1, p. 7) aidera certainement l'apprentissage s'il s'agit d'une tâche relativement élémentaire. En revanche, dans des tâches plus complexes, la simple indication de la séquence des opérations serait peu efficace.

Apprentissage de gestes précis

Un deuxième groupe d'objectifs de formation à l'aide de RA est l'apprentissage de gestes précis. L'apprentissage de gestes peut certes être considéré comme un apprentissage de procédures, mais les contextes d'utilisation, les fonctionnalités et les configurations matérielles des dispositifs d'aide à l'apprentissage de gestes diffèrent de ceux des dispositifs d'aide à l'apprentissage de procédures. Ce fait explique la nécessité d'une catégorie distincte. Les contextes d'utilisation privilégiés sont la rééducation fonctionnelle de la main (Gaggioli *et al.*, 2005 ; Luo *et al.*, 2006) et l'apprentissage de gestes

chirurgicaux (Soler *et al.*, 2004). Ces prototypes, qui deviennent de plus en plus matures, sont généralement fixes utilisant des écrans classiques de visualisation et des bras robotisés pour exercer les gestes à apprendre (fig. 6a). En termes de fonctionnalités, les dispositifs combinent une modélisation virtuelle de l'environnement ou l'objet à atteindre (par exemple, une structure anatomique donnée), présentée sur l'écran, et un retour d'information dynamique du bras robotisé (fig. 6b).



*Fig. 6. a) Prototype d'apprentissage de gestes chirurgicaux
b) Affichage utilisateur (d'après Soler et al., 2004)*

Comme les prototypes d'aide à l'apprentissage de procédures, les dispositifs destinés à l'apprentissage de gestes, notamment ceux pour la chirurgie, affichent à la fois des objectifs d'apprentissage et de guidage en temps réel. Dans ce cas, la fusion d'objectifs semble justifiée par le fait qu'il s'agit du même geste spécifique à apprendre ou à réaliser en utilisant un système d'assistance.

Visualisation et manipulation de mondes physiques inaccessibles

Un troisième groupe d'objectifs de formation est l'aide à la visualisation et/ou à la manipulation de mondes physiques et conceptuels qui sont difficilement représentables ou accessibles autrement : systèmes planétaires (Shelton & Hedley, 2002), concepts géométriques (Kaufmann & Schmalstieg, 2003), structures moléculaires (Jones, Minogue, Tretter, Negishi, & Taylor, 2006) etc. Ce groupe d'objectifs concerne généralement des prototypes destinés à l'éducation et au monde scolaire.

Un nombre plus limité de systèmes de RA visant l'aide à la visualisation et la manipulation de mondes physiques inaccessibles est utilisé pour la formation professionnelle. Par exemple, un prototype pour la formation médicale affiche et aligne spatialement et temporellement, sur un écran d'ordinateur classique, des données échocardiographiques provenant d'un appareil réel et un modèle de cet organe en trois dimensions (Weidenbach *et al.*, 2000). L'objectif, d'une part, est d'aider les étudiants en médecine à construire une représentation complète de la morphologie cardiaque. D'autre part, le système vise à aider les futurs médecins à faire le lien entre cette représentation et les données échocardiographiques, ce qui semble être une difficulté majeure pour les débutants.

Les prototypes d'aide à l'exploration de mondes physiques inaccessibles ne présentent pas de configurations matérielles spécifiques. Il existe aussi bien des systèmes fixes (par exemple, Jones *et al.*, 2006) que des systèmes portables (par exemple, Kaufmann, Steinbügl, Dünser, & Glück, 2005). Les dispositifs d'interaction sont également très variés et dépendent fortement du contenu à apprendre. Par exemple, un système d'aide à la construction de représentations spatiales en géométrie est constitué de dispositifs portables (visiocasques et tablettes graphiques) afin d'afficher des formes géométriques en 3D directement dans l'espace devant les yeux de l'utilisateur. Les concepteurs essaient ainsi d'aider la construction de représentations mentales de concepts géométriques abstraits (Kaufmann *et al.*, 2005). Un exemple différent est celui d'un prototype d'aide à la compréhension de nanophénomènes, reposant sur la manipulation de nano-objets, qui utilise un bras à retour d'effort dans le cadre d'une configuration matérielle fixe (Jones *et al.*, 2006).

Introduction d'éléments ludiques afin de faciliter l'acquisition d'informations complexes

Un quatrième groupe d'objectifs pédagogiques concerne l'introduction d'éléments ludiques à l'aide d'interfaces de RA dans le but de faciliter l'acquisition d'informations complexes chez des enfants. Logiquement, le contexte d'utilisation ciblé est l'éducation avec un accent spécifique sur la compréhension de concepts en physique, en mathématiques, en informatique. Quant aux éléments ludiques, ils sont introduits avec

l'utilisation d'interfaces tangibles⁴ comme dispositifs d'interaction (par exemple, Price, Rogers, Scaife, Stanton, & Neale, 2003 ; Wyeth & Wyeth, 2001). La grande majorité de ces prototypes sont fixes. Ainsi, Zuckerman, Arida, & Resnick (2005) proposent un jeu de construction qui utilise des briques « augmentées » par des capteurs d'information (c'est-à-dire des briques « tangibles », fig. 7).



Fig. 7. Interfaces tangibles (d'après Zuckerman et al., 2005)

A l'aide de ces briques, des enfants peuvent simuler d'une manière physique des concepts mathématiques tels que l'addition, les probabilités, les boucles, les variables, le branchement en informatique, etc. Les interfaces tangibles dans un contexte éducatif tentent d'encourager l'apprentissage implicite des petits, grâce notamment à leur tendance naturelle à explorer les objets physiques du monde environnant.

Plus rarement, les interfaces tangibles trouvent également des applications dans le domaine de la formation professionnelle, notamment en architecture où l'exploration multisensorielle de maquettes physiques est très importante (Fischer, Herr, Burry, & Frazer, 2003).

⁴ Les interfaces tangibles sont des objets physiques couplés à des capteurs d'information, qui permettent à l'utilisateur de se représenter, de contrôler et de manipuler l'information numérique qu'ils véhiculent (Ishii & Ullmer, 1997). Par exemple, des objets physiques de forme simple utilisés en entrée assisteraient la construction de représentations et, sur cette base, la conception d'un réseau IP (pour une démonstration, voir <http://tangible.media.mit.edu/exhibitions/ARS/video.html>).

Aide à l'animation de cours

Un dernier groupe d'objectifs de formation, peu discuté dans la littérature, est une aide apportée au formateur pendant l'animation d'un cours magistral en présentiel. Dans cette orientation, citons le prototype de la "salle de classe du futur" (Cooperstock, 2001). Le système de RA met en marche et configure les technologies de présentation (projecteurs, éclairage, logiciels de présentation, etc.) en fonction de l'activité de l'enseignant. Le dispositif repose sur une utilisation extensive de capteurs de mouvements et de systèmes de reconnaissance gestuelle. L'objectif de l'application est de laisser l'enseignant se concentrer sur le contenu enseigné en l'assistant dans le contrôle du fonctionnement des technologies. Encore une fois, le contexte d'utilisation privilégié reste l'éducation et le système est fixe.

2.2. Méthode pédagogique privilégiée et profils des utilisateurs ciblés par les prototypes de RA existants

Dans tous les systèmes étudiés, la méthode pédagogique affichée est la méthode active basée sur des mises en situation. Ceci explique le fait que l'utilisateur ciblé est essentiellement l'apprenant et la configuration pédagogique largement prédominante est l'autoformation. En effet, la référence aux méthodes actives est récurrente dans le domaine des technologies émergentes pour la formation selon des acceptations variées allant jusqu'à l'assimilation de l'apprentissage par l'action à la seule interactivité formelle du logiciel (Burkhardt & Wolff, 2002). Cependant, en règle générale, l'utilisateur est fortement limité dans ces interactions avec le système puisque les prototypes actuels ne proposent qu'un nombre restreint de fonctions (par exemple, rotation et sélection d'objets, pointage). Par conséquent et paradoxalement, les systèmes de RA pour la formation fonctionnent essentiellement comme des démonstrateurs, qui limitent les possibilités d'exploration autonome de la part de l'utilisateur. Ainsi, dans le prototype BARS pour l'entraînement militaire, déjà cité plus haut, l'interaction est actuellement limitée à des échanges de tirs entre les forces réelles et virtuelles (Livingston, Brown, Julier, & Schmidt, 2006). Une explication possible de ces limitations est le caractère encore émergent de la technologie. Plusieurs auteurs considèrent qu'une fois que ces limitations seront dépassées, la RA pourrait constituer un environnement favorable à l'apprentissage.

2.3. Intérêts de la RA pour la formation et l'apprentissage

Nombre d'idées fortes sur les intérêts de ce type d'IHM pour la formation coexistent. Les plus courantes peuvent être réunies dans les deux groupes suivants : fournir un double support réel - virtuel à l'activité, généralement de l'apprenant ; stocker et délivrer de l'information contextualisée. Un troisième groupe d'éléments hétérogènes concerne l'amélioration de l'utilisabilité des outils issus des technologies de la RV et l'accroissement de la motivation.

Fournir un double support réel - virtuel à l'activité de l'apprenant

Cet intérêt potentiel est explicité de diverses façons suivant les auteurs :

- apprendre par l'action ("learning by doing") et en situation permettrait de construire des connaissances d'une manière active et autonome (Fjeld & Voegtli, 2002) ;
- montrer simultanément des artefacts physiques, par exemple, une boîte de vitesse et les notions abstraites qui y sont associées, par exemple, les trajectoires de montage assurerait une compréhension plus facile des concepts techniques (Stedmon & Stone, 2001) ;
- faciliter l'élaboration de représentations de relations spatiales dynamiques et leur évolution dans le temps et l'espace (Shelton & Hedley, 2002) ;
- manipuler des objets familiers donnerait une sensation forte de "présence"⁵, ce qui faciliterait la mémorisation, le rappel et le transfert dans la situation de référence (Neumann & Majoros, 1998).

⁵ La présence désigne l'effet de faire percevoir comme réels les objets avec lesquels l'utilisateur interagit en RV (Burkhardt, 2003). Dans une autre perspective, la présence est assimilée à la déformation de la perception de l'espace chez l'utilisateur (Lombard & Ditton, 1997). Pour une discussion, voir Burkhardt (op. cit.).

Stocker et délivrer des informations contextualisées

Cette catégorie regroupe également une variété d'hypothèses ou d'affirmations telles que :

- stocker, visualiser et communiquer de l'information contextualisée servirait à l'apprenant au cours de la phase de recherche d'information sur un problème donné. Cette même caractéristique de la RA assurerait un meilleur suivi de l'élève par le formateur (Cooperstock, 2001) ;
- fournir des informations contextualisées en temps réel réduirait les risques d'erreurs pendant les sessions de formation (Neumann *et al.*, 1998) ;
- minimiser l'utilisation de supports en papier afin de laisser aux utilisateurs les mains libres lors des activités qui l'exigent durant la formation (Ward & Novick, 2003).

Améliorer l'utilisabilité comparativement à la RV et accroître la motivation

On trouve enfin deux autres lignes d'arguments concernant l'intérêt de la RA pour l'apprentissage et les applications de formation :

- Comparativement aux systèmes de RV, les dispositifs de RA poseraient moins de problèmes sensoriels relatifs aux "mal des simulateurs" (Slay, Phillips, Vernik, & Thomas, 2001). En effet, dans de nombreux dispositifs de RV, la perception est partielle et soumise à diverses incohérences entre les informations traitées par les différents récepteurs, par exemple, entre la vision et l'oreille interne. Ce problème disparaît lorsque le monde réel recommence à servir de base des processus perceptifs (Burkhardt, 2003).
- La RA accroîtrait la motivation de l'apprenant par le fait de la nouveauté du mode d'interaction (Zhong, Liu, Georganas, & Boulanger, 2003).

Le manque de validation empirique des hypothèses mentionnées ci-dessus peut être partiellement expliqué par deux facteurs : 1) les fonctionnalités limitées des prototypes de RA existants, qui permettent difficilement la création de scénarios réalistes d'évaluation et 2) le fait qu'aujourd'hui, la conception des systèmes de RA est marquée par une forte focalisation sur les seules caractéristiques techniques d'un outil qui, parfois, s'associe à

une réflexion peu approfondie sur les aspects ergonomiques de la technologie. Ces deux facteurs pourraient également expliquer le nombre réduit d'études empiriques de type ergonomique dans le domaine. A titre d'exemple, une synthèse récente sur des évaluations empiriques de prototypes de RA, ayant recours à la participation d'utilisateurs, montre que celles-ci occupent une place minime dans les programmes des principales conférences⁶ (Swan II & Gabbard, 2005). Sur 266 articles décrivant des prototypes de RA, seuls 21 (soit 8%) qui concernent des tests avec des utilisateurs. Mais il faut faire la part de la récence de la technologie, puisque les premières expériences de ce type ne datent que de 1995 (Swan II et *al.*, op. cit.).

2.4. Évaluations empiriques de l'utilisabilité et de l'utilité de la RA pour l'apprentissage

Nous avons recensé une quarantaine d'études présentant des résultats empiriques sur l'utilité et l'utilisabilité de la RA. Les principales revues et conférences qui ont alimenté notre synthèse sont : *Interacting with Computers*, *International Journal of Human-Computer Interaction*, *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, *Computer & Graphics*, *Human Factors*, *IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, *IEEE Virtual Reality Conference (IEEE VR)*, *International Symposium on Wearable Computers (ISWC)*, *Siggraph*, *ACM Computer-Human Interaction (CHI)*, *INTERACT*.

Schématiquement, les études recensées ont deux objectifs d'évaluation des systèmes de RA : elles concernent (1) l'utilisabilité des interfaces et des dialogues et (2) l'efficacité des prototypes pour l'apprentissage et les processus cognitifs impliqués.

2.4.1. Utilisabilité des interfaces

Les recherches sur l'utilisabilité des interfaces d'entrée d'information concernent principalement la commande vocale et des dispositifs traditionnels (clavier, souris, etc.). Les conclusions de différentes évaluations expérimentales peuvent être résumées en disant

⁶ Les 3 conférences qui ont alimenté la synthèse sont *International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, *International Symposium on Wearable Computers (ISWC)*, *IEEE Virtual Reality (VR)*. Les auteurs ont également utilisé des articles parues dans la revue *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* (Swan II & Gabbard, 2005).

que les dispositifs sonores ne sont pas adaptés aux environnements bruyants (Baber & Noyes, 1996) ; la précision de la reconnaissance vocale n'atteint pas 100%, ce qui diminue la vitesse de réalisation des tâches (Baber, Arvantis, Haniff, & Buckley, 1999 ; Baber, Haniff, Knight, Cooper, & Mellor, 1998) ; les dispositifs traditionnels sont difficilement associables à une activité manuelle constante (Baber, 2001). Quant aux dispositifs plus innovants tels que la reconnaissance gestuelle, ils disposent d'un vocabulaire de gestes assez limité (McDonald, 2003). En ce qui concerne les capteurs de position et de mouvement, chaque type présente des limites particulières. A titre d'exemple, les capteurs électromagnétiques sont difficilement utilisables dans un environnement métallique ; les capteurs ultrasoniques sont sensibles au bruit environnant ; les capteurs optiques sont relativement précis, mais posent des problèmes de calibration⁷. L'impact négatif de telles limitations doit être apprécié selon le contexte d'application.

Une solution temporaire à ces problèmes, avant la formalisation éventuelle de critères de conception et d'utilisation, pourrait être une utilisation limitée à un contexte spécifique, notamment de formation. Ceci demanderait une analyse fine de la tâche de référence, de la tâche formatrice et de la tâche élémentaire à exécuter. Mais l'utilisation de systèmes hybrides combinant divers types de dispositifs peut être une solution dans certains cas (Azuma, 1997).

Les recherches sur l'utilisabilité des interfaces de présentation d'information portent principalement sur les visiocasques, qui sont comparés à d'autres médias tels que des écrans classiques et des supports en papier. Il existe également des évaluations de prototypes de RA complets. Les données empiriques actuelles ne sont pas suffisantes pour établir des conclusions définitives sur l'utilisabilité des systèmes de RA dans un contexte de formation. Cependant, un nombre de tendances générales peuvent être dégagées, dont une synthèse est présentée ci-après.

Charge physique

Les résultats empiriques convergent sur ce point : les visiocasques et les projecteurs portables induisent une contrainte de charge physique. Certains modèles pèsent jusqu'à 1 kg et la concentration de cette charge est principalement localisée au niveau du front

⁷ Pour plus détails sur ces technologies, voir Azuma (1997).

(Baber, 2001 ; Baber & Baumann, 2002). La charge physique est encore plus grande quand l'utilisateur porte un prototype complet. Ainsi, le système BARS, déjà évoqué, pèse environ 4,5 kg (Goldiez *et al.*, 2004). Ceci pourrait induire de la fatigue, voire des troubles musculo-squelettiques (TMS) à long terme.

Outre la masse en tant que telle, la répartition est un deuxième facteur critique pour la charge physique. C'est pourquoi il est important que le poids des dispositifs portables, s'ils sont plusieurs, soit distribué d'une manière équitable entre les différentes parties du corps de l'opérateur. Le positionnement approprié des divers dispositifs portables sur le corps est fonction des positions adoptées par l'utilisateur pendant son activité. Ainsi, un port prolongé sur la tête peut être retenu si les mouvements de la tête n'ont pas une importance cruciale pour la prise d'information (Geelhoed, Falahee, & Latham, 2000). Mais, même des dispositifs légers peuvent s'avérer gênants lorsque la tâche exige une grande mobilité ou pendant des durées longues.

Charge mentale

Les résultats des études sur la charge mentale induite par les dispositifs d'interaction en RA sont beaucoup moins convergents que ceux concernant la charge physique. Certains auteurs rapportent que les sujets portant un visiocasque se plaignent du phénomène de rivalité binoculaire, d'une réduction de leur champ de vision et d'exigences attentionnelles très élevées (Baber *et al.*, 1999 ; Benko, Ishak, & Feiner, 2004 ; Ellis *et al.*, 1997). D'autres, en revanche, rapportent une faible gêne ressentie par les utilisateurs (Tang, Owen, Biocca, & Mou, 2003). Cependant, les expériences testant la charge mentale ont souvent été conduites en laboratoire et non sur le terrain où les contraintes réelles peuvent être plus fortes. De surcroît, les sujets portaient les casques pendant des sessions expérimentales relativement courtes. Par ailleurs, les conclusions ont été faites en utilisant l'échelle NASA TLX (Task Load Index), qui ne prend en compte que quelques uns des multiples paramètres de la charge mentale (Sperandio, 1980). C'est pourquoi nous ne pouvons pas généraliser facilement ces résultats à des applications utilisables pour des formations longues, notamment si celles-ci sont à réaliser sur un terrain industriel.

Impact sur la performance dans des tâches simples

Dans ce groupe, les études sur l'impact de différentes techniques de présentation de l'information sur la perception visuelle de la profondeur et de la distance sont les plus nombreuses. Sont analysés les effets du type de représentation graphique (par exemple, filaire vs. pleine), de divers niveaux d'opacité et d'intensité de la couleur, de la stéréoscopie, etc. (Gabbard *et al.*, 2005 ; Livingston *et al.*, 2003 ; Rolland *et al.*, 1995 ; Swan II *et al.*, 2006). Globalement, les résultats des différentes expérimentations sont assez prévisibles, différant peu des résultats classiquement observés en psychologie cognitive de la perception visuelle. Ainsi, on note des erreurs d'estimation de la distance des objets virtuels (surestimée ou sous-estimée). De plus, le nombre d'erreurs augmente avec l'augmentation de la distance. Cependant, ces erreurs de perception peuvent diminuer, si l'on introduit dans l'interface des effets graphiques tels que des nuances et des ombres, des variations des recouvrements et des textures, etc. Plus de détails sur ces expérimentations sont disponibles dans la synthèse de Swan II & Gabbard (2005), citée plus haut.

Nous avons réalisé une synthèse (Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, sous presse) sur les résultats de dix études utilisant des tâches simples telles que la détection, l'identification et le suivi de cibles, la réaction à des alarmes et la sélection d'objets virtuels. Les résultats de ces études montrent que le port d'un visiocasque n'améliore pas, voire même détériore les performances des sujets par rapport à l'utilisation d'un écran classique⁸ (Baber *et al.*, 1998 ; Baber, Knight, Haniff, & Cooper, 1999 ; Stedmon, Hill, Kalawsky, & Cook, 1999b ; Stedmon *et al.*, 2001). Le même constat est valable pour des prototypes de RA complets, qui, dans la majorité des cas, utilisent également des visiocasques comme dispositifs d'affichage (Aliakseyeu, Martens, & Rauterberg, 2006 ; Belcher, Billingham, Hayes, & Stiles, 2003 ; Lai & Duh, 2004 ; Tönnis, Sandor, Klinker, Lange, & Bubb, 2005). Plusieurs limitations technologiques des casques qui ont un impact sur la perception de l'utilisateur, peuvent expliquer ces résultats : la qualité de l'image qu'ils affichent est assez sensible aux variations de la luminosité, on note des défauts de présentation de la profondeur, des latences élevées de transmission des données, des problèmes de recalage des images réelles et des entités virtuelles, ainsi qu'un champ de vision limité (Azuma, 1997). Cette dernière caractéristique des casques pourrait expliquer

⁸ On trouvera à la fin de ce chapitre une synthèse synoptique des recherches citées dans cette partie (Tableau I).

« l'effet de tunnel » attentionnel observé par Yeh & Wickens (2001). De surcroît, des travaux montrent que la présence de références visuelles fixes dans le référentiel de la tête, telles qu'elles existent dans les visiocasques, peut contribuer à dégrader la perception de la verticalité (Mars *et al.*, sous presse ; Mars, Vercher, & Blouin, 2004).

Performance dans des tâches multiples

L'utilisation des visiocasques et le recalage précis des entités virtuelles et des objets réels peuvent se révéler avantageux quand il s'agit de donner un retour sur l'avancement d'une tâche élémentaire réalisée en parallèle avec d'autres tâches (Tableau I, Stedmon *et al.*, 2001 ; Yeh *et al.*, 2001). Ainsi, une des applications possibles de la RA par visiocasque pourrait être la formation sur le tas à des tâches de surveillance demandant une attention hautement partagée. Dans ce contexte, l'avantage principal de la RA serait la possibilité de fournir à l'apprenant un feedback rapide sur l'avancement de la tâche élémentaire qu'il est en train de réaliser.

Guidage dans l'exécution de procédures

Dans le domaine de l'assemblage, Wiedenmaier, Oehme, Schmidt, & Luczak (2003) ont montré que les sujets réalisent une tâche de montage / démontage plus rapidement s'ils sont guidés par un expert humain⁹. Cette condition a été comparée aux conditions « guidage par RA » et « guidage à l'aide d'un manuel en papier ». Malheureusement, dans cet article, peu de données sur le contenu des différents supports sont fournies. Les auteurs soulignent qu'à ce stade de développement technologique, les systèmes de RA ne peuvent pas remplacer l'expert humain, mais peuvent être assez utiles comparés aux supports en papier. Au contraire, d'autres études (par exemple, Haniff & Barber, 2003) ne montrent aucune supériorité du guidage à l'aide de la RA par rapport à un guidage au moyen de supports en papier. Il paraît donc difficile de conclure quant à l'efficacité d'un système de RA dans ce contexte, vu qu'en outre, une même information peut être présentée différemment en fonction du matériel (comme, par exemple, dans l'étude de Bristow, Baber, Cross, & Wooley, 2002, Tableau II). Également, Boud *et al.* (1999) comparent l'apprentissage de sujets dans trois conditions assez distinctes : schéma

⁹ On trouvera à la fin de ce chapitre une synthèse synoptique des recherches citées (Tableau II).

d'assemblage en deux dimensions, affiché sur l'écran d'un visiocasque semi transparent¹⁰ sans recalage ; dessin classique sur papier, différent du schéma mentionné ci-dessus ; et démonstration des opérations à réaliser en RV. Les effets propres au matériel utilisé s'intriquent à ceux propres à la technologie RA.

Également dans le domaine de l'assemblage, Tang *et al.* (2003) ont testé les performances sur une tâche en comparant quatre modes de présentation d'instructions pictographiques. Les résultats obtenus montrent que dans la condition « visiocasque semi transparent couplé à une capture des mouvements de la tête » les sujets sont, d'une part, plus rapides et, d'autre part, font moins d'erreurs. En effet, dans cette condition, les instructions d'assemblage sont affichées en temps réel en fonction des mouvements de la tête, tandis que dans la condition « visiocasque semi transparent », les informations sont présentes en permanence devant les yeux de l'utilisateur. Cependant, de nombreux aspects de la méthodologie comparative utilisée posent question quant à la généralisation des résultats. Par exemple, dans toutes les conditions, les sujets portaient un visiocasque semi transparent pendant la réalisation de la tâche. Les auteurs justifient ce choix par des soucis d'élimination des biais qui pouvaient être induits par le poids et le champ de vision réduit du visiocasque. Toutefois, l'application stricte du principe de l'expérimentation, c'est-à-dire « toute chose égale par ailleurs », a été ici malmenée. L'usage d'un visiocasque semi transparent inactif combiné à un écran traditionnel a peu de chance d'être observé dans une situation écologique, avec des opérateurs réels. Ainsi, la simplification des situations expérimentales et le maintien de conditions expérimentales trop strictes peuvent rendre difficile toute conclusion sur l'efficacité d'un dispositif sur un terrain industriel (Burkhardt *et al.*, 2003). D'une façon générale, du point de vue de l'intérêt des résultats, il aurait peut-être été plus intéressant de faire une comparaison entre les situations « non augmentées » et les situations modifiées.

Les résultats empiriques sur l'efficacité de la RA comme guidage procédural sont controversés pour d'autres tâches ou contextes, par exemple, pour le travail de bureau (Baber, Arvantis, Haniff, & Buckley, 1999), la conception architecturale (Aliakseyeu, Martens, & Rauterberg, 2006 ; Billingham, Belcher, Gupta, & Kiyokawa, 2003), les

¹⁰ Il existe deux principaux types de visiocasques : des visiocasques semi-transparents et des visiocasques vidéo. Les visiocasques semi-transparents permettent à l'utilisateur de percevoir directement une partie de l'environnement réel, tandis que, dans les visiocasques vidéo, l'image de l'environnement réel est enregistrée à l'aide d'une caméra et projetée ensuite devant les yeux de l'utilisateur. Pour plus de détails sur ces technologies, voir Azuma (1997).

fouilles archéologiques (Benko, Ishak, & Feiner, 2004), les visites touristiques (Bristow, Baber, Cross, & Wooley, 2002), etc. Notons, toutefois, que dans certains cas, il s'agit d'évaluations informelles et peu rigoureuses (ex. : Benko *et al.*, 2004 ; Bonanni, Lee, & Selker, 2005). Concernant le guidage procédural pendant la réalisation d'inspections de conformité et de qualité, Chung, Shewchuk, & Williges (1999) estiment que les systèmes de RA favorisent une réalisation rapide et précise de la tâche.

Ce même résultat positif est observé pour le guidage, et, par extension, pour l'apprentissage de gestes précis. Plusieurs études en conditions proches d'une évaluation sur le terrain ont montré que l'utilisation combinée d'un guidage visuel et haptique améliore la précision de ponctions chirurgicales (Konishi *et al.*, 2005 ; Rosenthal *et al.*, 2002). Également, des recherches suggèrent que de tels systèmes de RA augmenteraient la vitesse de réalisation du geste chirurgical (Soler *et al.*, 2004). Cependant, les expérimentations citées ci-dessus n'ont qu'un caractère exploratoire, comme le soulignent les auteurs eux-mêmes. C'est pourquoi, même si ces résultats présentent des pistes intéressantes de réflexion sur l'efficacité de la RA pour la réalisation et l'apprentissage de gestes précis, la formulation de conclusions définitives est prématurée.

Les données existantes sur l'utilisation de la RA en tant que moyen de guidage procédural ne nous permettent ni d'infirmer, ni de confirmer l'hypothèse selon laquelle montrer simultanément des artefacts physiques et les notions abstraites qui y sont associées facilite la compréhension des concepts techniques (Stedmon *et al.*, 2001). De même, la question de l'impact de l'information contextualisée sur le nombre d'erreurs commises par les opérateurs reste ouverte. De nouvelles études plus précises doivent être réalisées afin d'arriver à des résultats plus concluants.

Adaptabilité aux contextes et aux utilisateurs

Un résultat intéressant des études empiriques concerne l'adaptabilité des prototypes de RA à différents contextes de travail et différents modes opératoires. Baber *et al.* (1999) ont comparé les performances de secrétaires médicales pour l'entrée de données, soit en utilisant un visiocasque avec commande vocale, soit en travaillant dans leur environnement habituel sans utiliser aucun moyen d'augmentation technologique. Les résultats montrent que l'utilisation du système de RA réduit la variabilité inter- et intraindividuelle des modes opératoires des sujets. Les sujets en RA exécutent les mêmes séquences d'opérations,

c'est-à-dire celles affichées sur l'écran du visiocasque. A l'inverse, les sujets travaillant dans un environnement naturel montrent plus de variations de leurs modes opératoires. On trouve des résultats similaires dans le domaine de la maintenance d'avions (Ockerman & Pritchett, 1998). Nous pouvons cependant nous interroger sur les problèmes et gains éventuels que peut engendrer une réduction de la variabilité des modes opératoires. Ainsi, l'utilisation d'un système de RA pourrait se révéler avantageux pour des tâches demandant une application stricte de procédures, contrairement au cas de contextes de travail hautement dynamiques.

Conclusion sur les évaluations de l'utilisabilité

Plusieurs aspects généraux concernant l'évaluation de l'utilisabilité de la RA peuvent être soulignés suite à la revue de la littérature sur les études empiriques concernant l'utilisabilité des systèmes de RA. Tout d'abord, en raison du caractère novateur de la technologie, une grande partie des utilisateurs n'ont pas une expérience suffisante des systèmes évalués, ce qui modifie leurs performances et les rend difficilement généralisables (Bowman *et al.*, 2002 ; Wilson & D'Cruz, 2006). On peut évidemment supposer que l'on obtiendrait des performances supérieures avec des sujets plus expérimentés. En situation de formation, cependant, les sujets ne seront pas forcément expérimentés dans l'usage de la RA.

Ensuite, une partie importante des études est réalisée avec des échantillons de sujets relativement petits (cf. Tableau I), ce qui, ajouté à la grande variabilité des performances, rend difficile la formulation de conclusions définitives sur l'effet des facteurs en jeu.

Également, il existe des différences importantes entre l'évaluation de l'utilisabilité des technologies émergentes et l'évaluation de l'utilisabilité des systèmes interactifs plus traditionnels. La différence la plus saillante est le rôle de l'environnement physique (Bowman, Gabbard, & Hix, 2002). Ceci implique des méthodes d'évaluation mieux adaptées, voire innovées. L'ensemble de ces éléments doit donc être pris en compte pour une interprétation prudente des résultats empiriques décrits précédemment, qu'ils soient favorables ou critiques.

Enfin, il paraît difficile de raisonner uniquement en termes de limites et d'avantages d'une technologie particulière, étant donné que les tâches assignées aux sujets pendant les

tests, les interfaces et les fonctions des dispositifs, les contextes d'évaluation varient largement d'une expérience à une autre.

2.4.2. Évaluations empiriques de l'apprentissage

Des études, encore peu nombreuses actuellement, essaient d'aller au-delà des problèmes d'utilisabilité des interfaces en RA et visent à tester l'efficacité des systèmes pour l'apprentissage et les processus cognitifs impliqués. Notons dès à présent que les tendances exposées ci-après nécessitent d'être adossées à un corpus de données empiriques plus important.

Compréhension, mémorisation, rappel, efficacité de l'apprentissage

Pour Stedmon, Hill, Kalawsky, & Cook (1999a), un système de RA s'avérerait aussi efficace qu'un écran classique quant il s'agit de présenter des messages textuels courts et des icônes. De même, la mémorisation à court terme et le rappel seraient meilleurs¹¹. Comparé à des dessins classiques en papier et à un simulateur des opérations de montage en RV, l'affichage d'un schéma statique d'assemblage en RA se montrerait particulièrement utile pour le rappel (Boud *et al.*, 1999). Les sujets qui ont participé à l'expérience expliquent eux-mêmes ce résultat par l'utilisation d'indices importants se rapportant à la pièce réelle.

En revanche, les résultats expérimentaux relatifs à l'efficacité de l'apprentissage en RA et à la qualité du transfert dans la situation de référence restent contradictoires. Après 10 min d'apprentissage, Boud *et al.* (1999) notent une amélioration des performances des sujets entraînés en RA comparativement à la performance des sujets entraînés en RV ou avec des supports en papier. D'autres études ne montrent pas un effet notable de l'utilisation de la RA en tant que ressource pédagogique (par exemple, Brown, Stripling, & Coyne, 2006) ou arrivent à des résultats positifs, mais à partir d'évaluations informelles (par exemple, Kaufmann *et al.*, 2002 ; Kaufmann, Steinbügl, Dünser, & Glück, 2005 ; Shelton *et al.*, 2002 ; Wagner *et al.*, 2005 ; Weidenbach *et al.*, 2000). En outre, une partie de ces recherches comporte des biais méthodologiques (Tableau II). Ainsi, Shelton *et al.* (2002) testent un système de RA d'aide à l'enseignement de la géographie utilisant un

¹¹ On trouvera à la fin de ce chapitre une synthèse synoptique des recherches citées (Tableau III).

visiocasque comme dispositif d'affichage. La compréhension de concepts clés (ex. : équinoxe, rotation) est évaluée par des questionnaires pré- et post-expérimentaux auprès de 34 étudiants et les résultats montrent une différence significative entre les performances des sujets avant et après l'utilisation du système de RA. Les auteurs soutiennent l'idée que la compréhension de concepts clés est meilleure si elle est acquise par un apprentissage en RA. Cependant, les questionnaires pré- et post-expérimentaux, présentés aux mêmes sujets dans les deux phases de l'expérience, étaient répliqués à l'identique, ce qui fausse évidemment l'estimation. Dans ce cas, l'application peu rigoureuse de la méthode expérimentale remet en cause la validité des résultats. De plus, comme nous l'avions mentionné plus haut, dans plusieurs cas, les facteurs expérimentaux comparés ne sont guère équivalents (ex. : Boud *et al.*, 1999 ; Kaufmann *et al.*, 2002 ; Weidenbach *et al.*, 2000).

Communication et collaboration

Les études qui essaient d'évaluer la communication et la collaboration entre plusieurs utilisateurs dans une situation expérimentale sont rares. L'une d'elles est celle de Billingham, Belcher, Gupta, & Kiyokawa (2003). En comparant trois conditions, les auteurs montrent que le fait de travailler en RA n'augmente pas le nombre de prises de parole spontanées de la part des utilisateurs (Tableau III). Par contre, les auteurs observent un accroissement du nombre de questions posées, effet qu'ils attribuent à des difficultés d'utilisation du système de RA. Les avis des utilisateurs confirment que le prototype de RA est problématique pour l'utilisation, la communication et la compréhension mutuelle. Cependant, cette conclusion doit être tempérée par le fait que la majorité des prototypes de RA est technologiquement peu mature, et par conséquent, peu utilisable, ce qui peut expliquer en partie certains résultats négatifs

Satisfaction et motivation

Dans la majorité des cas, les utilisateurs (principalement des apprenants) trouvent utiles et satisfaisantes les fonctionnalités proposées et les performances des prototypes de RA (Boud *et al.*, 1999 ; Kauffman *et al.*, 2002 ; Shelton *et al.*, 2002 ; Zhong *et al.*, 2003). Cette tendance est également observée pendant l'utilisation d'interfaces tangibles par des enfants (Scarlatos, 2002 ; Wyeth & Wyeth, 2001). Les apprenants se disent prêts à utiliser

ces technologies. Toutefois, les études recensées ne se prononcent pas quant à un éventuel accroissement de la motivation d'apprentissage pouvant être dû simplement à la nouveauté du mode d'interaction.

Conclusion

Notre recherche bibliographique sur les attentes et les apports réels de la RA pour l'apprentissage montre qu'il existe un nombre beaucoup plus important de questionnements que de réponses établies dans le domaine. Ce constat est valable aussi bien pour la conception et les usages pédagogiques de la RA que pour l'évaluation ergonomique des dispositifs.

Les questions relatives à la conception et à l'évaluation de systèmes de RA pour la formation concernent à la fois des difficultés technologiques, des soucis d'utilisabilité et d'applicabilité industrielle des dispositifs. Les évaluations réalisées concernent principalement l'utilisabilité des interfaces, rarement le transfert en situation réelle. Cette restriction de l'orientation des travaux revendiquant en RA une approche centrée sur l'utilisateur constitue, actuellement, leur limite principale dans le cadre de la conception d'applications de formation. Majoritairement réalisées en laboratoire, d'une manière analytique, les études d'utilisabilité comparent différents dispositifs d'interaction afin de déterminer le plus pertinent pour la réalisation d'une tâche donnée. Les tâches utilisées sont souvent courtes et artificielles, de l'ordre de l'interaction élémentaire plutôt que de l'activité finalisée dans des situations visant à sauvegarder une certaine écologie. De plus, même s'ils proposent des pistes de réflexion, seul un nombre limité de résultats est directement transposable à la conception d'un système complet de formation, puisque, sauf en laboratoire, les dispositifs ne sont jamais utilisés de manière isolée. Or, "seule une analyse du système complet permet de préciser l'importance globale de chaque élément relativement au fonctionnement global" (Sperandio, 1980, p. 132).

Cette limitation des recherches actuelles peut être expliquée par le nombre réduit de prototypes opérationnels de RA, qui engendre une quasi absence d'évaluations avec de vrais utilisateurs et sur des tâches un tant soit peu réalistes. Le nombre de systèmes introduits sur un terrain industriel ou de formation réelle est, en effet, très limité. C'est pourquoi les affirmations sur l'utilité de la RA pour l'apprentissage reposent

principalement sur des réflexions, des suppositions et des attentes, plus que sur des données empiriques fiables.

Une possibilité d'améliorer l'ergonomie des systèmes actuels, aussi bien en termes d'utilité que d'utilisabilité, serait d'adopter une approche de la conception et de l'évaluation centrée sur l'utilisateur et ses besoins, notamment ses besoins d'apprentissage (Burkhardt, Lourdeaux, & Mellet d'Huart, 2003). Une telle approche engendrerait des études plus écologiques qui s'intéresseraient à la fois au transfert des connaissances dans la situation réelle et à la validité interne de l'outil de formation. En revanche, elle nécessite une réflexion approfondie, d'une part, sur les objectifs de formation, les fonctions à implanter dans les futurs dispositifs de RA, les catégories d'utilisateurs ciblées, le détail des tâches apprendre et, d'autre part, sur les méthodes d'ergonomie à employer pour analyser, formaliser et présenter ce type d'informations. Mayes *et al.* (1999) proposent une telle approche de la conception de technologies d'apprentissage. Ces auteurs distinguent 3 stades dans un processus général d'apprentissage : (1) conceptualisation ou premier contact de l'apprenant avec le système conceptuel à apprendre ; (2) construction ou appropriation des concepts par la réalisation de tâches d'apprentissage et (3) dialogue, c'est-à-dire communication du savoir appris et discussion sur les difficultés. Ces auteurs soutiennent l'idée que la conception d'une technologie pour la formation doit se concentrer sur des aspects différents selon le stade d'apprentissage à assister. Par exemple, puisque l'expérience de l'apprenant a une importance cruciale pendant la phase de conceptualisation, les caractéristiques des aides doivent être compatibles avec ses connaissances, ses besoins à un moment donné et ses attentes. Une solution possible est de présenter à l'utilisateur plusieurs niveaux de conceptualisation que lui-même pourra choisir en fonction de ses connaissances sur le sujet. Quant à la phase de construction, l'accent sera mis moins sur les caractéristiques de l'interface que sur la conception de tâches amenant à un apprentissage efficace. Pour des systèmes de support au dialogue, les efforts de conception devront s'orienter vers le type de dialogue à utiliser, les questions à poser, etc.

Tableau I : Études empiriques de l'utilité et l'utilisabilité de systèmes de RA pour des tâches simples

Étude	Facteurs	Tâches	Sujets	Variables dépendantes	Principaux résultats
Aliakseyeu, Martens, & Rauterberg, 2006	bureau physique vs. bureau augmenté avec 3 interfaces d'entrée : brique « tangible » ; stylet et technique « drag-and-drop » ; stylet et technique « pick-and-drop »)	sélection et insertion d'images dans des rectangles	20 étudiants en architecture et design industriel (18H/2F)	temps de réalisation de la tâche	stylet « pick-and-drop » > stylet « drag-and-drop » > brique tangible > papier physique
Baber, Haniff, Knight, Cooper, & Mellor, 1998	visiocasque vs. écran 14''	détection de cible	11 étudiants (7H, 4F) sans expérience avec les visiocasques	1) temps de réaction 2) nombre d'erreurs	1) écran < visiocasque 2) écran < visiocasque
Belcher, Billingham, Hayes, & Stiles, 2003	2D sur écran vs. 3D sur écran vs. 3D sur visiocasque ; graphes avec différents niveaux de complexité	détermination d'un chemin à deux arrêtes entre deux sommets d'un graphe	16 sujets (11H/5F)	1) temps de réalisation de la tâche 2) % d'erreurs 3) évaluations subjectives : facilité d'utilisation, préférence, performance)	1) RA 3D > 3D écran > 2D écran 2) 2D écran > RA 3D > 3D écran 3) 3D écran > RA 3D > 2D écran
Hix <i>et al.</i> , 2004	Système complet BARS	localisation et identification de cibles ; estimation de distances et de direction	5 sujets (3 marines et 2 experts de la technologie)	nombre d'erreurs satisfaction	85% des tâches réalisées correctement satisfaction générale, mais réserves sur la représentation graphique (trop chargée)

Lai & Duh, 2004	RA par visiocasque vs. RA sur écran LCD	détection du changement de la hauteur d'un bâtonnet graphique	12 étudiants (6H/6F) sans problèmes de vision	nombre d'erreurs	écran ~ visiocasque
Stedmon, Hill, Kalawsky, & Cook, 1999b	visiocasque vs. écran	identification de cible parmi des non cibles (bruit)	16 sujets (8H, 8F) sans problèmes de vision	temps de réaction nombre d'erreurs	pas de différence significative entre les deux conditions
Stedmon & Stone, 2001	visiocasque vs. écran utilisé pour la tâche principale	réaction à une alarme	Idem supra	temps de réaction	Idem supra
Tönnis, Sandor, Klinker, Lange, & Bubb, 2005	alarme visuelle en 2D en position fixe devant le pare-brise du véhicule vs. alarme visuelle en 3D devant les yeux du conducteur	détection et localisation d'une alarme	12 conducteurs (10H/2F) sans problèmes de vision	1) temps de réaction 2) nombre d'erreurs 3) déviation moyenne pendant la conduite 4) évaluations subjectives (performance, préférence, facilité d'utilisation)	1) 3D > 2D 2) 3D > 2D 3) 2D > 3D 4) 2D > 3D
Yeh & Wickens, 2001	indice sur vidéolunettes vs. absence d'indice ; cible attendue vs. cible inattendue	détection et identification de cible pendant une tâche de surveillance	16 militaires (15H, 1F)	1) distance de détection des cibles 2) nombre d'erreurs	1) si cible attendue => absence d'indice < indice 2) si cible inattendue=> indice < absence d'indice (« effet de tunnel »)
Stedmon & Stone, 2001	plusieurs écrans ; retour sur l'avancement d'une tâche présentée dans le champ de vision centrale vs. retour dans le champ de vision vs. sans retour explicite	tâches multiples	12 sujets (6H, 6F) sans problèmes de vision et sans expérience préalable de la RA (8H / 8F)	temps de réalisation de la tâche	RA < sans RA RA avec recalage < RA sans recalage

Tableau II : Études empiriques de l'utilité et l'utilisabilité de systèmes de RA pour le guidage procédural

Étude	Facteurs	Tâches	Sujets	Variables dépendantes	Principaux résultats
Aliakseyeu, Martens, & Rauterberg, 2006	papier « augmenté »	conception architecturale d'un arrêt de bus	19 architectes	évaluation informelle	outil utile et facile à utiliser
Baber, Arvantis, Haniff, & Buckley, 1999	guidage par visiocasque + commande vocale vs sans augmentation	entrée de données	10 secrétaires médicales	1) temps de réalisation 2) nombre d'erreurs	1) sans RA < RA 2) RA < sans RA
Billinghurst, Belcher, Gupta, & Kiyokawa, 2003	guidage tête-à-tête vs. tête-à-tête avec visiocasque vs. RA par projection sur grand écran	placement de 9 modèles de bâtiments (réel et virtuels) dans la maquette d'une rue	12 paires d'étudiants (14H, 12 F)	temps de réalisation de la tâche	tête-à-tête < projection < visiocasque
Benko, Ishak & Feiner, 2004	guidage par RA (visiocasque + gants de données + interaction gestuelle)	utilisation du système pendant des fouilles archéologiques	3 x 2 archéologues	satisfaction facilité d'utilisation	évaluation informelle, satisfaction générale des utilisateurs
Bonanni, Lee & Selker, 2005	guidage par RA (projection de la recette sur la surface d'un placard) vs. recette de cuisine papier	cuire un œuf préparer un plateau de petit-déjeuner	données indisponibles	temps de réalisation de la tâche	évaluation informelle, RA > papier
Bristow, Baber, Cross, & Woolley, 2002	guidage par RA (visiocasque) vs. pages Web vs. information disponible dans l'environnement réel	recherche d'information sur les bâtiments d'un campus universitaire	3 x 9 étudiants (23H/4F)	1) temps de réalisation 2) nombre de bonnes réponses	1) web > environnement réel > RA 2) web > environnement réel > RA

Chung, Shewchuk, & Williges, 1999	guidage par croquis sur papier vs. croquis sur ordinateur vs. croquis sur visiocasque ; 3 formes des pièces	inspection de la conformité de 3 pièces d'avion	3 x 12 étudiants sans expérience de la RA et de la tâche, sans problèmes de vision	1) temps de réalisation 2) nombre d'erreurs	1) RA < ordinateur < papier 2) RA < papier < ordinateur
Haniff & Baber, 2003	guidage par schéma 2D en RA, recalé vs. schéma papier	assemblage d'une pompe à eau réelle (8 composants)	10 étudiants (8H, 2F)	temps de réalisation	schéma papier < schéma en RA
Wiedenmaier, Oehme, Schmidt, & Luczak, 2003	guidage par manuel en papier vs. guidage par un expert humain vs. RA par visiocasque	montage / démontage d'une portière de voiture (22 étapes)	36 étudiants (36H) avec expérience en mécanique et électronique	temps de réalisation de la tâche	expert humain < RA < papier
Tang, Owen, Biocca, & Mou, 2003	guidage par manuel en papier vs. écran LCD vs. visiocasque vs. visiocasque + capture des mouvements de la tête (recalage)	assemblage de blocs de Duplo® (56 étapes)	75 étudiants (54H/21F) expérience de la RA	1) temps de réalisation 2) nombre d'erreurs	1) casque + recalage < casque sans recalage < écran LCD < papier 2) casque + recalage < écran LCD < papier < casque sans recalage
Konishi <i>et al.</i> , 2005	guidage par RA + sonde à ultrasons vs. sans RA	utilisation du système afin d'assister la navigation de la sonde	? chirurgiens	performance du système satisfaction	RA > sans RA RA > sans RA
Mischkowski <i>et al.</i> , 2005	guidage par RA (écran LCD) + Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) vs. sans RA	utilisation du système afin d'assister la planification du repositionnement de la mâchoire)	? chirurgiens	temps de réalisation de la tâche efficacité de l'assistance en RA	RA > sans RA (différence d'une heure) RA ~ sans RA

Rosenthal <i>et al.</i> , 2002	guidage par RA (visiocasque) + scanner à ultrasons vs. sans RA	utilisation du système pour assister le placement exact d'une aiguille de biopsie	1 radiologue	précision de la ponction (évaluation experte)	RA > sans RA
Soler <i>et al.</i> , 2004	guidage par RA + bras robotisé	Idem supra	3 ingénieurs + 3 chirurgiens + 1 professeur	temps de réalisation précision de la ponction (évaluation experte)	RA < sans RA bonne précision dans la majorité des cas
Wacker <i>et al.</i> , 2005	guidage par RA (visiocasque) + IRM	Idem supra	? radiologues	précision de la ponction (comparaison à des critères existants)	bonne précision dans la majorité des cas

Tableau III : Études empiriques de l'utilité et l'utilisabilité de systèmes de RA pour l'apprentissage

Étude	Facteurs	Tâches	Sujets	Variables dépendantes	Principaux résultats
Stedmon, Hill, Kalawsky, & Cook, 1999a	visiocasque vs. écran	rappel libre de nombre différent (4, 7, 10, 13) de mots et images	16 sujets (8H / 8F) sans problèmes de vision et sans expérience avec les visiocasques	nombre d'items rappelés correctement (mémoire à court terme)	pas de différence entre les deux conditions
Stedmon, Hill, Kalawsky, & Cook, 1999a	visiocasque vs. écran	compréhension et mémorisation de textes courts	Idem supra	Idem supra	Idem supra
Stedmon, Hill, Kalawsky, & Cook, 1999a	visiocasque vs. écran	compréhension et mémorisation d'icônes	Idem supra	Idem supra	Idem supra
Boud, Haniff, Baber, & Steiner, 1999	schéma d'assemblage en 2D sur visiocasque sans recalage vs. dessin classique papier vs. simulateur des opérations d'assemblage en RV (3 types de RV plus ou moins immersive)	assemblage d'une pompe à eau réelle (8 composants) 10 min d'apprentissage à l'aide des 3 modes de présentation	5x5 étudiants en ingénierie avec connaissances préalables de schémas et dessins en 2D, sans expérience avec la RA	1) temps d'assemblage, transfert 2) satisfaction	1) RA < RV < papier 2) RA évaluée comme très utile (informations supplémentaires obtenues au cours de la manipulation de l'objet réel pendant la phase d'apprentissage)
Brown, Stripling, & Coyne, 2006	apprentissage en RA vs. sans RA (uniquement explications orales)	nettoyage d'un terrain militaire (simulation avec des militaires jouant les ennemis)	16 sujets (4 équipes x 2 sujets dans chaque condition)	1) nombre de survivants 2) nombre d'ennemis	pas de différence entre les deux conditions

				tués 3) nombre de « neutres » non aidés	
Kaufmann & Schmalstieg, 2002	système de RA vs. sans système	utilisation du système ; apprentissage de concepts clés du domaine de la géométrie	14 étudiants	apprentissage de concepts clés satisfaction facilité d'utilisation	évaluation informelle, satisfaction générale, résultats positifs en termes d'apprentissage, système facile à utiliser
Kaufmann, Steinbügl, Dünser, & Glück, 2005	système de RA, 5 sessions d'apprentissage	Idem supra	15 lycéens (9H/6F)	évaluation subjective par questionnaire (utilisabilité, utilité)	satisfaction générale des utilisateurs, résultats positifs en termes d'apprentissage
Kustaborder & Sharma, 1999	schéma d'assemblage recalé sur écran vs. instructions en RA vs. instructions papier vs. sans instructions	assemblage d'un jouet (30 composants), phase d'apprentissage + 4 sessions successives d'assemblage	? ingénieurs, étudiants, sans connaissances techniques	1) temps d'assemblage	1) instructions papier < sans instructions, données sur les groupes utilisant le système en RA indisponibles
Shelton & Hedley, 2002	visiocasque vs. sans dispositif	utilisation du système pendant 2 jours dans un cadre éducatif	34 étudiants en géographie	transfert questionnaires pré- et post-expérimentaux identiques	résultats post-expérimentaux meilleurs que les résultats pré-expérimentaux, données sur la taille de l'effet indisponibles
Weidenbach <i>et al.</i> , 2000	RA vs. explication par formateur humain + ressources traditionnelles	utilisation du système ; apprentissage de concepts clés du domaine de l'échocardiographie	2 groupes d'étudiants en médecine utilisant le système pendant 1 jour	temps de réalisation de la tâche	évaluation informelle, RA < formateur humain + ressources traditionnelles, données sur la taille de l'effet indisponibles
Scarlatos, 2002	puzzle « tangible » vs.	construction d'un carré	3 passations de 2	stratégies de résolution	les groupes utilisant les

	puzzle standard	(période d'apprentissage) et d'une maison ensuite	groupes x 3 enfants	de problèmes	interfaces tangibles étaient plus près de la solution « correcte »
Wyeth & Wyeth, 2001	interfaces tangibles	apprentissage de la conception des programmes informatiques	28 enfants entre 4 et 6 ans	réalisation de la tâche compréhension	évaluation informelle, 26 ont réalisé la tâche correctement bon niveau de compréhension d'une syntaxe simplifiée
Zhong, Boulanger, & Georganas, 2003	visiocasque + clavier	montage d'un chip sur un switch AMT	18 étudiants (11H/7F), âgés de 18 à 45 ans, sans expérience de la RA	satisfaction facilité d'utilisation	évaluation informelle, système facile à utiliser et utile pour l'apprentissage
Wagner <i>et al.</i> , 2005	jeu (trains virtuels sur des rails réels), affichage sur des assistants personnels	utilisation du système	5000 visiteurs de 4 manifestations scientifiques	satisfaction facilité d'utilisation	évaluation informelle, satisfaction générale, durée d'utilisation moyenne : 60s
Billinghurst, Belcher, Gupta, & Kiyokawa, 2003	tête-à-tête vs. tête-à-tête en RA (visiocasque) vs. écran de projection + recalage (communication et collaboration)	placer 9 modèles de bâtiments (réel ou virtuels) dans la maquette d'une rue en fonction de 10 consignes données (5 consignes par sujet)	12 paires d'étudiants (14H, 12 F), tous les sujets passent toutes les conditions	1) nombre de prises de parole 2) nombre de questions posées 3) questionnaire subjectif sur la difficulté de travail et de compréhension	1) tête-à-tête > projection > RA 2) tête-à-tête < projection < RA 3) tête-à-tête < projection < RA

Chapitre 3

Besoins d'analyses ergonomiques dans le domaine des technologies émergentes

Introduction

Technologie émergente et donc, destinée à un usage futur, la RA reste peu répandue et peu connue par ses utilisateurs potentiels. Cette caractéristique rend difficiles l'expression, le recueil, l'analyse et la formalisation des besoins de ces mêmes utilisateurs. Or, cette analyse est très importante pour arriver à des produits qui doivent répondre aux attentes de leurs futurs « clients » (Davis & Zowghi, 2006). Ce constat est valable aussi bien pour les applications de formation que pour toute autre application possible d'une innovation technologique. En plus de cet intérêt général qu'offre l'analyse des besoins pour la conception de technologies émergentes en général et de RA en particulier, d'autres points de la démarche ergonomique peuvent être bénéfiques, aux différents stades de la conception et du développement des applications.

3.1. Principaux intérêts de l'analyse ergonomique dans le domaine des technologies émergentes

Plusieurs auteurs indiquent nombre de bénéfices résultant d'une analyse efficace des besoins. Nous pouvons citer :

- meilleure qualité du produit final grâce à une meilleure adéquation aux attentes des utilisateurs (Damodaran, 1996) ;
- délimitation plus précise des objectifs du projet (Nielsen, 1993) ;

- évaluation montrant que les produits bien ciblés sont supérieurs à leurs concurrents moins bien ciblés, disponibles sur le marché (Cooper & Kleinschmidt, 2000) ;
- abandon de nombreuses fonctions coûteuses, non souhaitées ou peu utiles pour l'utilisateur ;
- meilleure acceptabilité du système (Damodaran, 1996) ;
- effet positif sur l'usage du système conçu à court et moyen terme (Barki & Hartwick, 1991 ; Baroudi, Olson, & Ives, 1986) ;
- satisfaction générale des utilisateurs et niveau plus élevé de l'utilité perçue du système (Barki & Hartwick, op. cit. ; Foster & Franz, 1999) ;
- meilleure compréhension du système par les utilisateurs résultant en une utilisation plus effective de celui-ci ;
- meilleure compréhension et coordination entre tous les acteurs impliqués dans un projet de conception ;
- sentiment des utilisateurs d'avoir participé plus activement à la prise de décisions au sein de l'organisation (Damodaran, op. cit.) ;
- meilleure connaissance des opérateurs de leur propre travail et de leur entreprise (Wilson, Bekker, Johnson, & Johnson, 1996) ;
- nombre moins important d'itérations du cycle « analyse – spécifications – développement – évaluations » comparativement aux projets avec peu ou pas de participation d'utilisateurs (Chatzoglou & Macaulay, 1996).

Une des conditions nécessaires pour obtenir ces résultats positifs est de réaliser une analyse des besoins le plus tôt possible, généralement en amont de la conception d'un dispositif donné (Damodaran, 1996 ; Mayhew, 1999). Mais cette approche précoce n'est pas couramment adoptée dans le domaine des technologies émergentes, dont les concepteurs sont

majoritairement intéressés par les avancées techniques, secondairement par les besoins réels des futurs utilisateurs.

3.2. L'analyse des besoins ergonomique : une approche de la conception de technologies émergentes qui reste minoritaire

Une synthèse récente de la littérature, faite à partir de 220 publications de revues et de conférences dans le domaine de l'IHM¹², montre qu'une grande majorité des articles sélectionnés (entre 44% et 49% des publications concernant des technologies telles que la Réalité Virtuelle (RV), la Réalité Augmentée (RA) et certains systèmes mobiles très innovants) présente des recherches purement technologiques. Un autre grand groupe de publications (entre 21% et 37%) concerne des évaluations expérimentales de systèmes avec des utilisateurs. Les études portant sur l'analyse des besoins à des fins de conception ou de reconception représentent, quant à elles, moins de 10% de la sélection (Kjeldskov, 2003).

Plusieurs pistes pourraient être proposées pour expliquer ce constat. D'abord, à cause de leur originalité, il est rare que des technologies émergentes répondent à des besoins explicitement formulés, c'est-à-dire des besoins « conscients » (Robertson, 2001). Dans la majorité des situations, il s'agit plutôt de réalisations techniques en recherche d'applications, qui répondent à des attentes « latentes » (Sperandio, 2001) ou créent directement des besoins. On se retrouve souvent dans des situations où « on propose un système...parce qu'on sait le faire, en faisant l'hypothèse qu'il répond à un besoin » (Sperandio, op. cit.). Dans ce dernier cas, Robertson (op. cit.) parle de « besoins inimaginés » (« undreamed-of requirements ») et signale que les futurs utilisateurs ont des difficultés à les formuler sans aide d'une tierce personne ou d'un dispositif simulant le fonctionnement de la technologie innovante, par exemple (Bowers & Pycck, 1994). En outre, le besoin peut n'apparaître et s'intensifier qu'après un développement suffisant de la technologie (c'est même généralement le cas).

Dès lors, l'identification même des futurs utilisateurs devient problématique (Brangier & Bastien, 2006). Ainsi, même si ces technologies peuvent cibler un groupe d'utilisateurs

¹² Les 15 revues et conférences qui ont alimenté la synthèse de la littérature sont listées dans Kjeldskov (2003). Nous pouvons citer les exemples suivants : *Conference on Computer-Human Interaction (CHI)*, *Conference on Computer-Supported Cooperative Work (CSCW)*, *IEEE Conference on Virtual Reality (VR)*, *IEEE Conference on Augmented Reality*, *Journal of Virtual Reality*, *Journal of Computers & Graphics*.

potentiels, les caractéristiques et les tâches de ces derniers ne sont pas bien définies au début de la conception (par exemple, « réalité augmentée collaborative pour la navigation à l'extérieur et la recherche d'information »¹³, Reitmayr & Schmalstieg, 2004 ; « système interactif de réalité augmentée pour la formation en ingénierie »¹⁴, Liarokapis, Mourkoussis, Petridis, Rumsey, Lister, & White, 2002). Souvent et pour diverses raisons, les concepteurs de technologies émergentes n'acceptent ou ne demandent l'intégration des utilisateurs qu'à la fin du cycle de conception (Flores & Graves, 1988 ; Følstad & Rahlff, 2005). Par conséquent, comme mentionné plus haut, la grande majorité des interventions ergonomiques sur des technologies émergentes se limitent à des évaluations plus ou moins formelles (éventuellement itératives) des prototypes conçus et n'incluent pas une analyse fine des besoins lors des phases amont de la conception.

Des difficultés d'analyse des besoins peuvent également être dues à un nombre de principes « restrictifs » (Grundin, 1991) guidant parfois les actions des concepteurs, tels que la simplicité de la solution finale, la rapidité de développement, le réalisme et la conception orientée principalement vers la technologie (Følstad & Rahlff, 2005 ; Kjeldskov & Graham, 2003). Dans un projet, ces principes dirigent les efforts vers la conception d'un artefact qui fonctionne à tout prix, le plus rapidement possible, mais souvent hors de son contexte d'utilisation (Foster & Franz, 1999 ; Stary, 2002). Ainsi, les possibilités d'analyser les besoins et d'anticiper les futurs usages sont largement limitées, voire l'utilité de ce type d'analyses est remise en question.

Des difficultés additionnelles résident dans le fort attachement des concepteurs à leur statut d'experts (Bodker & Gronbaek, 1991). Dans le dialogue avec les autres acteurs du projet (utilisateurs, ergonomes), les ingénieurs et les designers ont souvent peur de remettre en cause cette image en allant chercher des solutions de conception auprès des utilisateurs. Afin d'illustrer cette posture typique, Bruseberg & McDonagh-Philp (2002) citent un designer indépendant d'appareils électroménagers qui estime que « ce n'est pas une bonne idée de passer beaucoup de temps à convaincre un client que je suis un bon designer et, ensuite, de

¹³ « *collaborative augmented reality for outdoor navigation and information browsing* ».

¹⁴ « *interactive augmented reality system for engineering education* ».

commencer à demander de l'argent pour faire des études avec des utilisateurs afin de générer des idées innovantes »¹⁵.

Enfin, il faut admettre que, quand il s'agit de technologies émergentes, des difficultés d'analyse des besoins proviennent également de certaines limites des connaissances ergonomiques disponibles. L'utilisation de nombreuses méthodes et techniques ergonomiques ou relevant de disciplines proches ne donne pas toujours les résultats espérés, puisque ces méthodes n'anticipent pas toujours très bien les besoins « émergents » (Sperandio, 2001).

Les méthodes les plus souvent utilisées, ainsi que des exemples de leur application dans le domaine de la RA seront présentés ci-après. Plus de détails sur les méthodes d'analyse des besoins peuvent être trouvés dans Maguire & Bevan (2002), Robertson (2001), Robertson & Robertson (2006). Des discussions sur l'application de certaines techniques, leurs avantages et leurs limites dans le cadre du projet de conception, dans lequel s'inscrit notre thèse, peuvent être trouvées à la fin de chaque chapitre décrivant nos recherches empiriques, ainsi que dans la conclusion finale.

3.3. Méthodes utilisées pour l'analyse ergonomique des besoins de technologies émergentes

Les méthodes et les techniques utilisées pour l'analyse des besoins dans le domaine des technologies émergentes, en général, et dans celui de la RA, en particulier, peuvent être regroupées dans les quatre catégories suivantes :

- méthodes qui s'appuient sur les connaissances de la littérature, pertinentes pour la future situation d'usage ;
- scénarios et techniques dérivées ;
- évaluations formelles et informelles de maquettes et de prototypes ;
- extrapolation des besoins à partir d'une activité existante (Brangier & Bastien, 2006 ; Burkhardt, 2006 ; Burkhardt & Sperandio, 2004).

¹⁵ « *It is not a good idea to spend lots of time to convince a client that I am a good designer, and then to start asking for money to do user research to generate novel ideas* ».

Ces quatre catégories de méthodes seront présentées brièvement dans les paragraphes qui suivent.

L'utilisation des connaissances de la littérature, pertinentes pour la future situation d'usage, comme méthode d'analyse des besoins

Les connaissances de la littérature, disponibles sous différentes formes (revues de questions, critères et principes ergonomiques généraux, normes) sont utilisées afin recueillir des données sur les qualités ergonomiques de dispositifs technologiques similaires, déjà existants.

Quand elle est faite pendant la phase d'analyse des besoins, une telle utilisation a plusieurs objectifs :

- obtenir de l'information sur les domaines d'application privilégiés des technologies existantes et,
- extraire ainsi des fonctionnalités potentiellement utiles afin de constituer une base « de besoins à réutiliser » (Robertson & Robertson, 2006) pour de futurs développements ;
- appuyer les conclusions sur le niveau actuel de satisfaction des besoins des utilisateurs ;
- identifier les erreurs à ne pas répliquer dans le système à concevoir, ainsi que les éventuelles solutions correctrices à apporter (Brangier & Bastien, 2006 ; Maguire & Bevan, 2002).

Dans le domaine de la RA, les recueils de connaissances sur les besoins des utilisateurs et, d'une manière générale, les recueils de connaissances ergonomiques sont peu nombreux. A notre connaissance, il n'existe pas de synthèse en ergonomie concernant, par exemple, les applications de RA dans le domaine de la formation, ainsi que les besoins des utilisateurs de ce type d'aides pédagogiques.

Quand il s'agit de connaissances ergonomiques sur l'évaluation de prototypes de RA, ce manque est moins saillant. Nous citons Gabbard & Hix (2001) comme exemple de recueil

de recommandations à utiliser pendant l'évaluation de l'utilisabilité de prototypes de RA. Dans la majorité des cas, il s'agit d'adaptations de principes utilisés pour les systèmes interactifs traditionnels (par exemple, Bach, 2004) et/ou pour des systèmes de RV (par exemple, Gabbard, op.cit.). Une troisième limitation de cette méthode, soulignée par Burkhardt (2006) à propos de la RV, est le manque de validation empirique d'une grande partie des recommandations qui, en outre, semblent surtout rappeler des principes de bon sens, étant donné leur degré de généralité. Une confirmation de ce constat pourrait être trouvée dans le chapitre précédent, qui expose une synthèse sur des évaluations de l'utilisabilité des interfaces de RA.

Plusieurs spécificités des technologies émergentes et de leur évaluation peuvent expliquer l'insuffisance de critères ergonomiques utilisables. D'abord, les interfaces comparées sont très nombreuses et très variées, ce qui engendre des performances et des comportements humains également très disparates. Ensuite, les dispositifs d'interaction évoluent constamment. Par conséquent, l'établissement de critères ergonomiques d'évaluation, qui soient suffisamment généraux, cohérents, consolidés et utiles pour les concepteurs de système de RA s'avère une tâche difficile. Actuellement en RA, le travail sur des critères spécifiques concernant, par exemple, la perception de la profondeur, les métaphores d'interaction, etc., nous semble une piste de recherche plus prometteuse que celle de la recherche de critères généraux de conception et d'évaluation. Wilson & D'Cruz (2006) arrivent à des conclusions similaires à propos de l'évaluation de l'utilisabilité des systèmes de RV.

Ainsi, l'application de connaissances ergonomiques, disponibles dans la littérature, se révèle largement insuffisante comme seule source alimentant l'analyse des besoins de systèmes de RA. C'est pourquoi elle doit être complétée par d'autres méthodes, par exemple, des scénarios d'utilisation du futur système (Carroll, 1995) et un nombre de techniques dérivées telles que des cas d'utilisation (« use cases ») ou des « personas » (Copper, 1999).

Les scénarios d'utilisation et les techniques dérivées comme méthode d'analyse des besoins

Les scénarios et les cas d'utilisation sont calqués sur les activités qu'un utilisateur peut réaliser en poursuivant un but particulier. Ainsi, pour les personnes concernées (utilisateurs,

concepteurs, décideurs), ces outils donnent une représentation concrète de l'utilisation réelle ou possible d'un système (Carroll, 2000). La technique des « personas » est assez proche de celle des scénarios. Elle consiste à créer un ou des personnages imaginaires, portant des noms propres, dotés de certains traits de personnalité et, généralement, symbolisés par une image ou un dessin (Robertson & Robertson, 2006). Utilisée notamment dans des cas où les utilisateurs ne sont pas très bien identifiés, cette technique permet de créer des représentations sommaires, fictives et caricaturales, mais cependant palpables, de chaque groupe d'utilisateurs potentiels (Robertson *et al.*, op.cit.).

Les scénarios et les techniques dérivées peuvent prendre différentes formes telles que des descriptions textuelles, des listes de fonctions, des présentations PowerPoint, des bandes dessinées, des animations, des vidéos. Dans le domaine de la RA, les scénarios sont majoritairement présentés en forme textuelle (par exemple, Balaguer, Lores, Junyent, & Ferré, 2001) ou en forme de vidéos (par exemple, le scénario d'utilisation du prototype The Magic Book, disponible à l'adresse suivante : <http://www.mic.atr.co.jp/~poup/research/ar/index.html>). Les vidéos sont particulièrement adaptées à la RA, qui dans la majorité des cas, implique une présentation visuelle, voire multimodale, des informations destinées à l'utilisateur.

Quand il s'agit d'analyser les besoins de technologies émergentes, les avantages principaux des scénarios, des cas d'utilisation et des « personas » sont de faciliter les discussions autour des fonctionnalités du futur système (Sutcliffe, 2002) et, ainsi, d'aider la concrétisation du plus grand nombre de besoins qui sont peu ou pas explicités (Maguire & Bevan, 2002).

En revanche, dans ce contexte, ces outils de conception présentent trois limites majeures. D'abord, ils peuvent être incomplets puisque les futurs usages d'une technologie émergente sont, par définition, peu établis. Ensuite, ils peuvent exprimer, d'une manière trop privilégiée, le point de vue exclusif de la personne qui les a créés (Sutcliffe, 2002). Enfin, le caractère concret des propositions peut inhiber l'imagination des acteurs d'un projet et limiter la recherche de nouveaux usages possibles (Lindgaard *et al.*, 2006).

Afin de dépasser cette dernière limite, les scénarios et les techniques dérivées gagnent à être présentés aux acteurs du projet dans le cadre de groupes de discussion (« focus groups »¹⁶). Cette forme d'interaction sociale est préférable pour au moins deux raisons. D'abord, elle permet des échanges entre les différentes catégories d'acteurs impliqués dans un projet (principalement concepteurs et utilisateurs). Ensuite, elle propose un mode d'interaction ouverte, censée faciliter la recherche d'un grand nombre de solutions innovantes (Maguire & Bevan, 2002 ; Robertson, 2001).

Pour la même raison, les groupes de discussion peuvent servir également de cadres d'évaluations plus ou moins formelles de prototypes.

L'évaluation de prototypes comme méthode d'analyse des besoins

Même si, à l'origine, cette méthode n'était pas destinée à l'analyse des besoins, à la différence des tests d'usage (Brangier & Bastien, 2006), les évaluations ergonomiques de prototypes, fondées sur la participation des utilisateurs, deviennent un des outils les plus souvent utilisés pour (re)définir des applications potentielles.

Les évaluations ergonomiques de prototypes peuvent être formelles ou informelles. La différence est qu'une évaluation formelle repose sur l'application rigoureuse de principes expérimentaux, alors qu'une évaluation informelle est souvent conduite sans contrôle systématique des facteurs à prendre en compte. Un exemple paradigmatique d'évaluation informelle dans le domaine de la RA est l'utilisation de prototypes par des visiteurs lors de manifestations grand public (expositions, salons, etc.).

A titre d'exemple, la définition précise des besoins d'un système de RA, qui assiste les architectes pendant les phases exploratoires de création de concepts et de croquis, a été réalisée à l'aide de plusieurs évaluations formelles et informelles de prototypes (Aliakseyeu, Martens, & Rauterberg, 2006). Également, les concepteurs d'un système de guidage procédural en maintenance, développé dans le cadre du projet européen STARMATE, ont utilisé un prototype, qu'ils ont évalué d'une manière plutôt informelle afin d'extraire de

¹⁶ Pour une description détaillée de la technique et de son utilisation, voir, par exemple, Bruseberg & McDonagh-Philp (2002).

nouveaux besoins (résultats disponibles sur l'adresse suivante : <http://vr.c-s.fr/starmate/feedback.htm>).

Les principaux avantages des prototypes comme support d'analyse des besoins sont essentiellement les mêmes que ceux mentionnés à propos des scénarios. En revanche, comparativement aux scénarios, les prototypes représentent des formes beaucoup plus physiques de la future technologie. En tant que telles, ils permettent non seulement de cerner ou de créer des besoins, mais également d'identifier facilement des erreurs évidentes de conception et de simuler des interactions sensorielles avec le dispositif (Bowers & Pycock, 1994 ; Robertson & Robertson, 2006).

Malheureusement, dans la grande majorité des cas, les évaluations ergonomiques de dispositifs très innovants portent sur des prototypes techniquement et fonctionnellement peu matures et peu stables (Kalawsky, 1993). Ce type de prototypes est utile pour l'évaluation de divers aspects cognitifs de l'interface (par exemple, l'organisation de l'information, l'enchaînement des écrans, etc.), mais donne peu de résultats convaincants quand il s'agit d'aspects sensoriels tels qu'un feedback tactile, par exemple (Hall, 2001). Or, ces caractéristiques sensorielles sont souvent inhérentes aux technologies émergentes. A ce problème s'ajoute la tendance des opérateurs à étendre aux prototypes peu matures des attentes et des modèles mentaux, grandement influencés par leur expérience de technologies plus traditionnelles et fonctionnellement assez matures, ce qui, généralement, dévalorise la technologie innovante (Terrenghi, Kronen, & Valle, 2005). Comme le résume Sperandio (2001), « l'opinion des opérateurs (ou des utilisateurs) est biaisée, notamment par la force conservatrice des habitudes ».

Il s'en suit que l'évaluation ergonomique de prototypes, en raison même de leur immaturité ou de leur application faiblement ciblée, ne peut pas viser une extraction exhaustive des besoins réels. L'évaluation risque de pointer uniquement les erreurs de conception mentionnées plus haut et, ainsi « d'aboutir à un résultat trivial ne justifiant pas le coût de sa mise en œuvre » (Burkhardt, 2006). Ce fait explique, en partie, l'attitude de certains concepteurs qui jugent, d'une part, les utilisateurs peu créatifs et, d'autre part, les résultats des évaluations ergonomiques trop négatives (Bruseberg & McDonagh-Philp, 2002 ; Heinbokel et al., 1996). En outre, l'évaluation de prototypes peu matures pourrait provoquer une frustration, voire même un rejet de la technologie par l'utilisateur, dans la mesure où

celui-ci se fait une mauvaise image du produit final optimisé. Ceci n'est, bien sûr, pas propre à la RA. Toute évaluation d'un prototype, quel qu'il soit, est biaisée par le fait que celui-ci s'écarte plus ou moins, - et quelquefois beaucoup - , du produit final, mûr et stabilisé.

C'est pourquoi il nous semble important de croiser les résultats des évaluations ergonomiques de prototypes avec des résultats d'études, fondées sur l'application d'autres méthodes impliquant des utilisateurs. Dans le domaine des technologies émergentes, les méthodes visant l'extrapolation des besoins à partir d'une activité existante présente une ouverture dans cette direction.

L'extrapolation des besoins à partir d'une activité existante

Dans cette catégorie, on différencie classiquement les méthodes de recueil de données (par exemple, observations ouvertes, observations instrumentées, entretiens plus ou moins directifs, verbalisations, analyse documentaire, etc.¹⁷) et les méthodes de formalisation et de présentation des résultats (par exemple, formalismes de modélisation des tâches et des utilisateurs, utilisés en ergonomie¹⁸).

La méthode des entretiens, en tant que méthode d'approche des besoins envers une technologie encore inconnue des utilisateurs potentiels, est largement utilisée en ergonomie. Elle peut s'appliquer, en effet, à la RA, comme à d'autres technologies émergentes. Un exemple est l'étude faite par Wolff & Sperandio (2000) pour un prototype d'équipement individuel informatisé, destiné aux fantassins de l'armée française. Des entretiens ont été menées (sur le terrain) avec des fantassins de différents grades, ne connaissant pas ou peu l'équipement encore à l'état de prototype, afin de situer les attentes latentes, mais aussi les contraintes opérationnelles du dispositif en projet. La méthode est fertile si l'échantillon des sujets est suffisamment varié et de taille suffisante, et si toutes les faces de l'activité des futurs utilisateurs sont explorées.

Dans le domaine de la RA, les entretiens et les questionnaires adressés à de futurs utilisateurs et/ou des experts de la tâche à assister, représentent deux des méthodes de recueil de besoins les plus souvent utilisées. Une explication possible de cette préférence pour les

¹⁷ Pour plus de détails, voir Sperandio (1980).

¹⁸ Pour une revue, voir Sperandio (2003).

entretiens en tant que méthode d'analyse des besoins est leur mise en œuvre relativement rapide et peu coûteuse. Ainsi, afin de définir l'interface et les fonctionnalités d'un prototype de RA, qui assisterait des militaires pendant leurs déplacements dans des terrains peu connus, les ingénieurs et les ergonomes travaillant sur le dispositif ont consulté un officier de la marine (Gabbard *et al.*, 2002). De même, deux opérateurs d'une raffinerie ont été interrogés et ont rempli un questionnaire en amont de la conception d'un système de RA d'aide à la formation d'ingénieurs pétrochimistes débutants (Träskbäck & Haller, 2004). Cependant, dans les exemples cités ci-dessus, ainsi que dans d'autres études similaires (par exemple, Träskbäck & Nieminen, 2003), l'intérêt des entretiens et des questionnaires est limité par le nombre très réduit d'opérateurs consultés.

Notons que, dans la majorité des cas, il ne suffit pas de demander aux futurs utilisateurs d'une technologie émergente ce qu'ils veulent comme fonctions (Van Schaik, 1999) et cela pour plusieurs raisons. D'abord, les utilisateurs se concentrent plus sur leurs tâches quotidiennes et non pas sur la technologie à concevoir (Foster & Franz, 1999). Ensuite, étant donné qu'il s'agit de technologies de pointe, il n'est pas évident pour une personne (utilisateur ou décideur) d'exprimer des exigences envers un dispositif dont elle ignore les capacités techniques et les avantages en termes de fonctions (Leonard & Rayport, 1997). Enfin, les utilisateurs ne spécifient pas toujours les fonctionnalités du futur système dans une forme facilement utilisable par les concepteurs (Van Schaik, 1999). Souvent, ils formulent, en effet, des problèmes et non pas des solutions technologiques (Bruseberg & McDonagh-Philip, 2002). De surcroît, les besoins exposés sont assez hétérogènes. Différents futurs utilisateurs exposent des problèmes différents (Sperandio, 2001 ; Van Schaik, op. cit.). A titre d'exemple, dans une recherche au moyen d'entretiens centrés sur l'utilité des PDA pour le travail des internes en médecine, les 15 sujets interviewés formulent une application possible et dominante de cette technologie. Il s'agit de pouvoir télécharger des informations de la base des archives hospitalières. Mais plusieurs autres idées, assez hétérogènes, ont également été exprimées. Ainsi, quatre internes voulaient aussi avoir la possibilité, à l'aide des PDA, de recevoir des informations sur les nouveaux médicaments ; deux autres internes voulaient avoir accès aux notes de leurs collègues, ainsi qu'aux celles des infirmières ; 3 internes voulaient utiliser les PDA surtout pendant leur visites au domicile du patient (Barrett, Strayer, & Schubart, 2004).

Toutes ces difficultés de formulation de besoins expliquent, en partie, le fait que, dans des entretiens et des questionnaires, les utilisateurs expriment rarement d'une manière directe leurs attentes concernant une technologie émergente. Quand cela se fait, il s'agit généralement de besoins relativement « conscients » (Robertson, 2001) et explicites soit pour l'analyste, soit pour la personne interrogée.

La combinaison des entretiens et des questionnaires avec d'autres méthodes de recueil de besoins est un des moyens destinés à résoudre le problème posé par l'extraction d'attentes conscientes uniquement. Dans certaines études présentées dans la littérature, les données obtenues à partir des entretiens et des questionnaires sont complétées par une analyse documentaire (ex. : Gabbard *et al.*, 2002), par une analyse de la littérature sur le type d'activité à assister (ex. : Aliakseyeu, Martens, & Rauterberg, 2006) ou par des observations de l'activité des opérateurs (ex. : Aliakseyeu *et al.*, op.cit. ; Mackay, 2000). L'utilisation de telles méthodes, et notamment d'observations ouvertes et instrumentées, permet de mettre en évidence certaines difficultés des tâches, ainsi que, par exemple, des stratégies de résolution de problèmes, qui, souvent, sont difficilement explicites par les opérateurs. Par conséquent, les observations en situation de travail peuvent se révéler un moyen efficace pour préciser des besoins non explicites (Kaulio & Karlsson, 1998 ; Kujala, 2003).

Cependant, comme le soulignent Brangier & Bastien (2006), l'analyse de l'activité se révèle plus difficile quand il s'agit de dispositifs innovants que quand il s'agit de dispositifs traditionnels, puisque la technologie n'existe pas et l'activité se construit au fur et à mesure que le projet d'innovation se définit. On se retrouve donc dans un contexte de conception où la situation à analyser est à produire.

En outre, les études ergonomiques, notamment celles utilisant des observations, sont majoritairement descriptives puisque centrées sur les pratiques actuelles des opérateurs. En ce sens, elles sont rarement suffisamment prédictives (Sperandio, 2001) et les recommandations et les spécifications qui en résultent sont perçues comme trop vagues ou trop modestes par les concepteurs (Berg, Taylor, & Harper, 2003). De surcroît, la quantité de données recueillies et, logiquement, le temps nécessaire pour leur analyse peuvent être considérables (Rowley, 1996). Ce dernier constat n'est pas nouveau. Lahy & Pacaud (1948), cités par Leplat (2006), notent : « L'analyse du travail est la chose la plus longue et la plus difficile, car c'est elle qui pose avec précision le problème scientifique ». Toutefois, ces auteurs ne s'arrêtent pas sur ce

point. Ils précisent : « Prétendre pouvoir résoudre un problème de cet ordre sans analyse préalable du travail reviendrait à prescrire des médicaments à un malade sans l'avoir examiné ou encore à vouloir perfectionner une machine sans connaître ni sa construction, ni son fonctionnement ».

Malheureusement, le recours à ces méthodes de recueil et d'analyse, réputées plus objectives, reste rare en amont de la conception de systèmes de RA. Le même constat est valable pour les méthodes de modélisation et présentation des résultats (mais voir Masso & Lopez, 2004 ; Trevisan, Vanderdonckt, & Macq, 2003). Nous pouvons avancer deux hypothèses pour expliquer ce constat. La première concerne le nombre limité de projets intégrant des aspects relatifs aux utilisateurs et à l'ergonomie des technologies. La seconde, liée à la première, concerne l'insuffisance, en ergonomie, d'outils méthodologiques spécifiques pour le recueil, la modélisation et la présentation des résultats d'une analyse des besoins dans le domaine des technologies émergentes.

3.4. Principaux cadres théoriques

Dans le domaine des technologies émergentes, l'utilisation des méthodes d'analyse des besoins se fait en s'appuyant sur deux principaux cadres théoriques, à savoir la conception participative et la conception centrée sur l'utilisateur (Brangier & Bastien, 2006 ; Burkhardt & Sperandio, 2004).

La conception participative

La conception participative recouvre plusieurs approches, techniques et méthodes, assez différentes les unes des autres, dont la caractéristique commune est le rôle particulièrement actif des futurs utilisateurs joué pendant la spécification et pendant l'évaluation d'une technologie (Muller, Haslwanter, & Dayton, 1997). Originaire des pays scandinaves, la conception participative a également été appliquée dans d'autres pays d'Europe, ainsi qu'aux Etats-Unis. Les auteurs travaillant dans ce cadre abordent les utilisateurs non pas comme des simples sources d'information ou comme des sujets d'observation, mais comme des acteurs actifs de la conception. Dans certaines formes de l'approche, les utilisateurs sont même considérés comme des co-concepteurs (Ehn, 1993 ;

Rabardel, 2005). En tant que tels, ils participent au processus d'innovation en analysant leur propre travail et en planifiant les transformations à y apporter. Souvent, les utilisateurs sont mis en contact direct avec les concepteurs (Bowers & Pycock, 1994). Les trois principes suivants sous-tendent et expliquent cette orientation :

- **La participation démocratique des tous les acteurs concernés dans un projet de conception** : ce postulat, clairement énoncé dans les conceptualisations scandinaves de l'approche, est également valable pour la majorité des adaptations de la conception participative dans d'autres pays. Il est explicable par un mouvement général vers la démocratisation des relations employeurs – employés, entrepris dans les pays nordiques au cours des années 1970.
- **Efficiencia, expertise et qualité** : particulièrement souligné par les praticiens américains, ce principe concerne le fait que la participation d'utilisateurs experts, dont les connaissances sur leur propre activité compléteront celles des concepteurs de technologies, est censée augmenter l'efficacité du processus d'innovation, ainsi que la qualité du résultat final.
- **Engagement des utilisateurs finaux** : empruntée aux sciences de l'organisation, cette idée concerne le fait qu'un système, une nouvelle organisation de travail, une technologie seront plus facilement acceptés, si les utilisateurs finaux ont pris une part active dans la prise de décisions organisationnelles concernant la transformation (Muller, Haslwanter, & Dayton, 1997).

Ces trois principes de la conception participative, bien qu'assez attirants dans une perspective de transformation des situations de travail, ne sont pas facilement mis en œuvre dans des projets de conception industriels. A la différence des projets de recherche, dans les projets industriels, la participation des utilisateurs à la prise de décisions organisationnelles, par exemple, est souvent limitée. Également, l'opérationnalisation du principe de participation démocratique n'est jamais simple (Gulliksen, Boivie, & Göransson, 2006). Enfin, dans le cadre d'approches participatives prônant un contact direct entre les concepteurs et les utilisateurs, les concepteurs se retrouvent souvent dans des situations où ils ne disposent pas de tous les outils méthodologiques nécessaires pour reconnaître, analyser ou classer les problèmes ergonomiques d'une technologie (Smith & Dunckley, 2002). A titre d'exemple,

une étude récente sur des réunions de conception montre que, dans la majorité des cas analysés, les concepteurs considéraient les utilisateurs comme des éléments non automatisés du système homme - machine ou comme des acteurs dans un scénario imaginaire d'utilisation (Darses & Wolff, 2006). Dans la même lignée, une autre idée, qui oriente certains choix de conception ou d'aménagement de situations de travail, est celle que l'opérateur a forcément besoin d'aides technologiques, de consignes, de procédures et de restrictions, « parce que les compétences ou habilités ou capacités d'adaptation des opérateurs / utilisateurs sont trop souvent minimisées dans l'esprit des concepteurs » (Sperandio, 2001). Ces représentations sont probablement construites et renforcées pendant la formation des concepteurs (Darses & Wolff, op. cit.). Ainsi, nous ne pouvons que souligner l'importance de la réalisation d'analyses ergonomiques par des spécialistes du domaine, notamment dans des contextes culturels et professionnels, où la formation des concepteurs insiste peu sur l'intégration de l'ergonomie et des utilisateurs dans les projets de conception.

Le cycle de conception centrée sur l'utilisateur

Le cycle de conception centrée sur l'utilisateur est le second cadre théorique, dans lequel évolue la conception de technologies émergentes. Cela représente, en effet, l'orientation dominante des recherches dans ce domaine, qui essaient d'intégrer plus ou moins des aspects relatifs aux utilisateurs. Les recherches présentées dans cette thèse s'appuient également sur la philosophie du cycle de conception centrée sur l'utilisateur.

Le cycle de conception centrée sur l'utilisateur est une démarche dont l'objectif principal est d'accroître l'utilité et l'utilisabilité des systèmes interactifs ou de tout autre produit (dans une perspective de conception plus large). C'est un processus itératif, qui comporte plusieurs étapes successives, généralement décrites et organisées de la manière suivante : analyse des besoins, conception d'une première solution, évaluation ou test de celle-ci, réalisation d'un produit, implémentation et suivi (Bastien & Scapin, 2004 ; Brangier & Barcenilla, 2003 ; Mayhew, 1999). En s'appuyant sur l'article de Bastien & Scapin (op. cit.), nous présentons très brièvement, dans le paragraphe qui suit, chaque étape du cycle, ainsi que ses objectifs principaux.

La première étape du cycle de conception centrée sur l'utilisateur, qui est l'analyse des besoins, a pour objectif de décrire, spécifier et, éventuellement, modéliser les caractéristiques

des utilisateurs ciblés par le produit à concevoir, les tâches auxquelles il est destiné, l'environnement matériel, organisationnel, social, etc., dans lequel elles sont réalisées. C'est également pendant l'étape de l'analyse des besoins que sont définis les objectifs d'utilisabilité du futur produit. Il s'agit ici de critères quantitatifs (par exemple, un certain temps nécessaire pour la réalisation d'une tâche donnée) et qualitatifs (par exemple, relatives à la nature des connaissances nécessaires pour utiliser le produit), qui permettront d'évaluer une partie des orientations prises lors de la conception.

La deuxième étape du cycle de conception centrée sur l'utilisateur est la production de solutions de conception (par exemple, maquettes pouvant prendre différentes formes physiques, prototypes plus ou moins matures, etc.). A cette étape, l'objectif principal de l'ergonome est d'évaluer, de valider et, éventuellement, d'améliorer les solutions proposées auprès des futurs utilisateurs. Pour l'ergonome, l'avantage principal de travailler à cette étape de la conception réside dans la possibilité de modifier l'interface relativement rapidement grâce aux formes flexibles sous lesquelles elle se présente.

Ensuite, une fois une solution « finale » choisie, l'ergonome doit à nouveau intervenir pour l'évaluer. Cependant, comme le soulignent Bastien & Scapin (2004), l'évaluation ne doit pas être réalisée uniquement à la fin du cycle de conception puisque, dans ce cas, l'impact des modifications proposées sur la qualité ergonomique du produit conçu pourrait être mineur.

La dernière étape du cycle de conception centrée sur l'utilisateur est l'installation et le suivi de l'utilisation du produit final. Ce type d'évaluation est généralement réalisé dans une situation réelle de travail ou d'utilisation. L'objectif de cette évaluation est de décrire et de comprendre des stratégies et des difficultés d'usages, non observés lors des tests avec des (futurs) utilisateurs dans les phases précédentes.

Le cycle de conception centrée sur l'utilisateur « traditionnel » assigne à l'analyse des besoins des utilisateurs une place en amont de la conception d'un produit donné. Par exemple, Gould (1987) décrit le processus de conception comme comprenant les 4 phases suivantes : 1) adaptation, 2) conception initiale, 3) développement itératif et 4) implémentation. L'analyse des besoins doit être effectuée pendant la phase de « conception initiale », tandis que la phase de « développement itératif » est réservée à la réalisation itérative d'évaluations. Des approches plus récentes insistent sur le fait que le développement d'un produit est construit sur la base de plusieurs cycles « analyses – conception – évaluations » (Mayhew, 1999 ;

Vredenburg, Isensee, & Righi, 2002). Par conséquent, des analyses des besoins doivent être réalisées pendant chaque cycle de développement. Ce point est particulièrement important pour les technologies émergentes, dont les usages possibles, ainsi que la vision des utilisateurs, des ergonomes et des concepteurs de ces usages se construisent au fur et à mesure de l'avancement du projet de conception.

Conclusion : nécessité de triangulation des méthodes et des cadres théoriques

La brève revue sur les méthodes d'analyse des besoins, utilisées lors de la conception de technologies émergentes montre que toute méthode possède ses propres avantages et inconvénients. Pour cette raison, aucune méthode n'est suffisante par elle-même. La combinaison de plusieurs méthodes d'analyse des besoins s'impose. Cette approche classique, visant à élargir et améliorer l'exactitude de la compréhension du phénomène étudié, est définie comme une « triangulation méthodologique » (Følstad & Rahlff, 2005 ; Kaulio & Karlsson, 1998). Les auteurs ayant introduit ce terme insistent sur la nécessité d'utiliser plusieurs sources de données et plusieurs cadres théoriques pour interpréter le même corpus de données. Bien évidemment, cette approche doit être appliquée d'une manière adaptée, en fonction des contraintes spécifiques de chaque projet de conception. C'est ce que nous avons essayé de faire dans cette thèse. Les études empiriques réalisées, les méthodes utilisées et les résultats obtenus sont décrits dans les chapitres qui suivent.

Chapitre 4

L'analyse des besoins au moyen d'entretiens avec les futurs utilisateurs dans le contexte de la maintenance automobile¹⁹

Introduction

Ce chapitre présente deux études qui ont en commun l'utilisation d'une même méthode de recueil des données, à savoir des entretiens semi dirigés, qui ont été réalisés avec des techniciens en maintenance automobile et des acteurs de la formation à cette maintenance (formateurs, stagiaires, concepteurs de formations). Trois questions de recherche sont au cœur de ces deux études. La première concerne les avantages et les limites des entretiens semi-dirigés avec les futurs utilisateurs pour l'analyse des besoins de technologies émergentes.

La deuxième question, liée à l'étude de l'activité des mécaniciens et des acteurs de la formation dans le contexte des dernières évolutions de la conception automobile, porte sur les difficultés rencontrées par les opérateurs dans cette activité, ainsi que sur les ressources qu'ils utilisent pour résoudre les problèmes qu'ils rencontrent.

La troisième question de recherche concerne l'applicabilité et l'utilité potentielle d'un système de RA pour l'activité de maintenance et la formation à cette maintenance.

Les études ergonomiques sur l'activité de maintenance automobile

La maintenance est généralement définie comme un ensemble d'actions techniques et administratives, destinées à maintenir ou à remettre un équipement dans un état lui permettant d'accomplir une fonction requise (Leplat & Savoyant, 1972 ; Fadier & Mazeau, 1996).

¹⁹ Ce chapitre a donné lieu à deux publications (Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Ehanno, 2005 ; Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Leservot, 2005).

Suivant cette définition, la maintenance après-vente de véhicules comprendrait toutes les opérations réalisées et réalisables sur une voiture (détection et diagnostic de pannes, montage et démontage de pièces défectueuses, révisions périodiques, etc.) dans le but de le restituer en état au client.

Très peu d'études ergonomiques traitent de l'impact des évolutions récentes sur l'activité des mécaniciens automobiles. Quelques tendances générales peuvent cependant être dégagées.

En premier lieu, on remarque une évolution de la nature même de l'activité de maintenance, qui provoque un changement progressif des approches ergonomiques du domaine. Ainsi, jusqu'aux années 1980, la maintenance automobile était considérée comme une activité à forte composante physique, constituée essentiellement d'opérations de montage et démontage. Cela est dû, entre autres, au fait que les pièces mécaniques présentes sur les véhicules produits à cette époque étaient lourdes. En conséquence, la plupart des études ergonomiques sur la maintenance de véhicules, datant de cette période, sont centrées sur des contraintes physiques telles que le bruit, l'éclairage, le dimensionnement du poste de travail, les postures, les vibrations des outils, les conditions atmosphériques, les gaz d'échappement. La question ergonomique par excellence est leur impact sur la santé et les performances des opérateurs (Long, 1986 ; Reich, 1986 ; Virokannas, Anttonen, & Niskanen, 1994). Les questions de charge mentale étaient alors secondaires, car les opérateurs avaient une bonne maîtrise cognitive des véhicules sur lesquels ils travaillaient.

Avec l'introduction de composants électriques dans les véhicules, l'intérêt des ergonomes quant à l'activité des mécaniciens de véhicules s'oriente progressivement vers des problèmes liés à des facteurs de nature plus cognitive. Les problèmes de charge physique tendent à diminuer (sans disparaître pour autant) et parallèlement les problèmes de charge mentale augmentent. Un autre phénomène industriel s'ajoute à cette évolution : les systèmes mécaniques et électriques et leurs combinaisons deviennent de plus en plus hétérogènes, tendent à changer avec une plus grande rapidité que les systèmes purement mécaniques, et, en conséquence, induisent des difficultés de compréhension aux opérateurs (Weill-Fassina, Filleur, & Poulier, 1989). C'est pourquoi l'activité étudiée est principalement l'activité de diagnostic de pannes, cruciale pour le bon déroulement du travail des mécaniciens dans de telles conditions (Bertrand & Weill-Fassina, 1993 ; Chabaud, Lasserre, Soubie, Sperandio, &

de Terssac, 1990 ; Patrick, James, & Friend, 1996 ; Reising & Sanderson, 1995). Les résultats généraux de ces études sont des modèles du processus de diagnostic. Un tel exemple est un modèle générique du diagnostic, proposé par Schraagen & Schaafstal (1996). Les auteurs s'en réfèrent comme « structure de la tâche de diagnostic » et soulignent qu'elle pourrait être retrouvée dans plusieurs domaines professionnels. Schraagen & al. (op. cit.) décrivent le modèle de la manière suivante : à partir des symptômes d'une panne l'opérateur commence des recherches de ses origines possibles. Les différentes possibilités envisagées sont testées au fur et à mesure de l'avancement du processus pour en choisir une qui sera appliquée pendant la résolution de la panne.

On commence à évoquer, dans ce contexte, un besoin d'aides au diagnostic, d'autant qu'à cette époque également apparaissent des systèmes d'aide (à la décision, à la formation, etc.), dits « systèmes – experts », que les industriels acquièrent ou développent, en escomptant à la fois un gain de temps des opérations de maintenance et un allègement de la formation. Ainsi, Weill-Fassina, Filleur, & Poulier (1989) soutiennent l'idée, qu'afin de remédier à ces problèmes, les systèmes d'aide doivent assister les mécaniciens dans la construction de représentations fonctionnelles correctes du système diagnostiqué. Avoir une représentation fonctionnelle implique le fait de connaître au moins les pièces composant le système, leurs noms, leur fonctionnement, leurs liens fonctionnels et la signification des symptômes.

Les études de cette deuxième période sont majoritairement réalisées au moyen de simulations de tâches précises de diagnostic, soit en laboratoire, soit sur le terrain. Ces études, bien que très intéressantes, ont une limitation majeure : elles présentent souvent des cas de diagnostic sur des systèmes relativement stables et simples, sans intégrer ni les contraintes induites par les aspects organisationnels du travail, ni celles induites par les évolutions récentes de la conception automobile.

Des tentatives d'une telle intégration n'ont été faites que récemment. Barkai (2001) met en avant les interactions suivantes entre les conditions actuelles de conception de véhicules et le diagnostic :

- En général, d'un point de vue des concepteurs, le diagnostic est considéré comme une activité *ad hoc*. En tant que telle, elle n'est pas prise en compte dans les phases amont de conception d'automobiles et d'outils d'assistance à la maintenance.

- A cause des délais de production et de formation raccourcis, les connaissances des mécaniciens sur les procédures de diagnostic, ainsi que sur les véhicules eux-mêmes, sont en cours de construction, non stabilisées et difficilement accumulables à une échelle organisationnelle.
- Elles sont peu formalisées et constituent rarement une base convenable pour des modèles de diagnostic à implanter dans des outils d'assistance.
- A cause de leurs connaissances lacunaires sur le fonctionnement des mécanismes de contrôle et diagnostic automatiques dans l'automobile, les opérateurs les perçoivent comme des "boîtes noires" (terme également utilisé par Uzan, 1985, à propos des techniciens de biens électroménagers). Cette perception est renforcée par la logique d'échange standard » (c'est-à-dire la tendance de remplacer directement le composant en panne par une pièce neuve, au lieu de le réparer). En conséquence, les mécaniciens acquièrent peu de savoirs et savoir-faire nouveaux. De plus, ils n'exploitent pas comme une aide efficace au travail les données que les technologies de diagnostic automatique fournissent.
- A cause de l'hétérogénéité et la complexité des composants diagnostiqués, les opérateurs travaillent sur une grande variété de pannes et d'origines diverses.

Des études sur l'activité de recherche de panne en électronique complètent cette brève description des interactions entre certains changements technologiques et l'activité des mécaniciens automobiles. Les difficultés de diagnostic suivantes sont soulignées :

- une apparition simultanée de plusieurs défaillances, qui peuvent ou non avoir une liaison fonctionnelle entre elles (Reising, 1993) ;
- une disparition ou une dissimulation de certains symptômes par d'autres, apparus a posteriori, avec ou sans intervention de l'opérateur (Kim, Yoon, & Choi, 1999). Cette contrainte s'ajoute à « l'opacité » du système (c'est-à-dire la logique de la « boîte noire ») ;
- l'intégration de plusieurs fonctions dans un seul composant (Reising & Sanderson, 1995).

Un autre regard vers l'activité des opérateurs de maintenance est porté par Grusenmeyer (2002). En analysant la gestion de l'information entre les opérateurs de maintenance et d'exploitation d'une chaufferie nucléaire, elle note que les opérateurs en maintenance occupent une position cruciale, du fait qu'ils sont en aval de la chaîne conception – production – entretien et, en tant que tels, leur activité est fortement "tributaire des informations détenues par les autres". Ainsi, les opérateurs de maintenance reçoivent de l'information de tous les acteurs en amont et sont obligés de faire face à nombre d'erreurs non ou partiellement résolues dans des phases antérieures du processus. On pourrait transposer ce cadre d'analyse à la maintenance de véhicules, surtout en ce qui concerne la recherche de pannes, et les liens avec la conception.

Toutes ces interactions et transformations récentes du métier des mécaniciens engendrent des besoins forts de formation au diagnostic et à l'utilisation des outils d'assistance, souvent peu maîtrisés (Service Tech Magazine, 2001). Nos recherches présentées ci-après ont essayé d'apporter des données empiriques et une réflexion sur ces problèmes nouveaux.

4.1. Étude 1 : Entretiens avec des techniciens en maintenance automobile

La première recherche est exploratoire. Elle s'est déroulée en deux étapes. Tout d'abord, nous avons réalisé des entretiens et des observations à la fois en atelier et en situation de formation sur de nouveaux modèles de véhicules. Ces entretiens et observations préliminaires, enregistrés par prise de notes et à l'aide d'un caméscope, nous ont servi à acquérir une connaissance générale des objectifs opérationnels de l'activité en maintenance automobile et des liens de cette activité avec la formation et la conception de véhicules. Nous avons ensuite utilisé une adaptation de la technique des incidents techniques (Flanagan, 1954) pour étudier l'activité de maintenance d'une manière plus approfondie. Cette étude est décrite ci-dessous.

Les observations et les entretiens ont été réalisés dans 4 concessions et 1 succursale de la région parisienne²⁰. Le choix de ce type de structures était motivé par les deux aspects suivants :

- Les opérateurs en concessions et succursales traitent plus de véhicules récents que leurs collègues en agences. Leur activité est donc plus fortement liée aux dernières évolutions techniques.
- Ces opérateurs ont plus l'habitude d'utiliser de nouvelles technologies, dont une future assistance par la RA, les outils informatiques étant introduits plus rapidement dans les concessions et succursales que dans les agences.

Les observations et les entretiens en sessions de formation ont été réalisés dans les locaux du Service de Formation de Renault en région parisienne.

4.1.1. Méthodologie

Sujets

Les opérateurs participant à l'étude ont été choisis selon leur fonction en atelier. Dans le réseau de maintenance de Renault les mécaniciens ont deux niveaux de qualification professionnelle correspondant à deux fonctions différentes en atelier :

- MECA : mécaniciens assurant principalement la réparation de pannes peu complexes ou déjà diagnostiquées ;
- COTECH : anciens mécaniciens possédant la qualification professionnelle de "Coordinateur technique". Ces opérateurs sont prioritairement responsables du diagnostic de pannes complexes sur des véhicules récents, ainsi que de la formation interne dans les équipes de travail.

Au total, onze mécaniciens, 5 MECA et 6 COTECH, âgés de 20 à 51 ans ($M = 39$, $ET = 9,8$), ont participé à l'étude. L'expérience moyenne des opérateurs en tant que mécaniciens

²⁰ *Le réseau après-vente de Renault est constitué de concessions et succursales, rattachées à la Régie, et d'agences - réseau secondaire, constitué de structures privées de petite taille.*

était de 20 ans (Min = 3, Max = 37). Les COTECH avaient en moyenne 10 ans d'expérience dans cette fonction (Min = 3, Max = 15).

Procédure

Comme mentionné plus haut, l'étude utilise une adaptation de la Technique des Incidents Critiques (TIC, Flanagan, 1954).

La TIC consiste à recueillir d'une manière systématique des observations ou des rappels de comportements particulièrement efficaces ("incidents positifs") ou inefficaces ("incidents négatifs") par rapport aux objectifs d'une activité de travail donnée. Flanagan (1954) définit un incident comme "toute activité humaine observable qui est suffisamment complète en elle-même pour qu'on puisse, à partir d'elle, faire des inductions et des prévisions sur l'individu qui accomplit l'action". Pour être "critique", l'incident doit se produire "dans une situation où le but ou l'intention de l'action paraît suffisamment clair pour l'observateur ou les conséquences de l'action sont assez évidentes" et constituer "une contribution "significative", positive ou négative, au but général de l'activité. La définition de "significative" dépendra de la nature de l'activité". Dans notre étude, la TIC porte sur des récits d'opérateurs, décrivant des situations de pannes, vécues récemment.

Le choix de cette technique était motivé par les arguments suivants :

- Elle permet un premier diagnostic global et relativement rapide des difficultés, rencontrées dans la situation de travail étudiée (Bisseret, Sébillote, & Falzon, 1999).
- L'activité de maintenance de véhicules récents étant irrégulière dans le temps, il est difficile de fixer a priori les moments et conditions d'observation directe en atelier.

Les entretiens se sont déroulés après une brève présentation orale des objectifs du projet et de la technologie à concevoir. Ils ont été réalisés en individuel sur le poste de travail, pendant les heures de travail régulières, après avoir obtenu l'accord des personnes interviewées. Les opérateurs étaient libres d'utiliser tout outil matériel de travail (outils de diagnostic, documentation technique, etc.) afin d'illustrer des idées, évoquées dans leur récit.

Les entretiens ont duré de 20 min à 3 h avec une moyenne de 45 minutes. La confidentialité et le caractère anonyme des informations ont été garantis et respectés.

Les entretiens semi dirigés ont été menés à l'aide d'une grille d'entretien (voir Annexe 1). La consigne limite explicitement la notion d'*incident* au diagnostic et/ou à la réparation de pannes "particulièrement intéressantes" sur des véhicules récents, et ceci pour plusieurs raisons. Premièrement, nous estimons que le diagnostic et la réparation d'une panne peuvent être considérés comme des incidents suivant la terminologie de Flanagan (1954), puisqu'ils représentent des comportements suffisamment bien définis pour que l'on puisse en tirer des conclusions sur des difficultés rencontrées dans la situation de travail étudiée. Deuxièmement, l'utilisation du terme "intéressantes" visait à orienter les sujets vers des faits marquants qui s'écartent plus ou moins du déroulement normal de l'activité. Troisièmement, étant donné l'objet de l'étude, la consigne limitait les exposés aux modèles récents de voitures.

Le terme *critique* s'entend comme la difficulté ou la facilité perçue de la situation, racontée par le sujet.

L'ergonome demandait expressément un nombre égal d'incidents positifs et négatifs, c'est-à-dire de pannes particulièrement faciles ou difficiles à résoudre et/ou réparer.

Traitement des données obtenues et schéma de codage

Les données obtenues sont constituées de 81 récits sur des situations de diagnostic et de réparation de pannes sur des véhicules récents. Ces récits ont été obtenus au cours de 11 entretiens, enregistrés sur bande magnétique, et ensuite intégralement retranscrits. Les données représentent une durée totale d'enregistrement de 12h45. Les récits contiennent des informations sur les caractéristiques de la situation de travail exposée (activité réalisée, difficultés rencontrées, résultat des actions entreprises, outils utilisés, particularités du véhicule), ainsi que des précisions sur les caractéristiques des opérateurs impliqués.

A partir d'une analyse thématique du contenu et conformément à la procédure décrite par Flanagan, les récits des opérateurs sont analysés et organisés dans plusieurs classes, constituées en fonction des objectifs du travail des mécaniciens.

L'unité d'analyse choisie est l'incident critique (IC), défini comme la situation de diagnostic et réparation d'une panne et déterminé par une séquence de comportements

(identification et interprétation des symptômes de la panne, réparation, utilisation d'assistance, etc.). Chaque IC concerne un problème concret sur un véhicule particulier. Un codage manuel a été réalisé tel qu'à chaque IC sont associées les caractéristiques suivantes :

- **Facilité / Difficulté perçue de la panne (IC+/IC-)** : C'est le facteur critique principal, dans le sens de Flanagan (1954).
- **Résolution de la panne** : Si le résultat de l'intervention sur la panne est positif, l'IC est classé dans "Panne résolue", sinon – dans "Panne non résolue".
- **Activité critique exposée** : Si l'activité exposée concerne principalement la recherche de panne, l'IC est classé dans la catégorie "Diagnostic". Si l'activité principale décrite concerne le montage / démontage, l'IC est classé dans la catégorie "Réparation".

La grande majorité des récits des opérateurs comporte une multitude de facteurs critiques, qui contribuent tous à la perception de la difficulté (ou de la facilité, au contraire) de l'activité. Afin d'optimiser le nombre de classes et d'avoir des classes exhaustives, les récits ont été catégorisés selon un seul facteur critique, évalué explicitement comme déterminant par le sujet, qui favorise la compréhension du sens de la situation et émerge en premier dans le discours. Notre catégorisation repose sur, d'une part, les données empiriques, et, d'autre part, les modèles du processus de diagnostic, décrits dans la littérature ergonomique (Bertrand & Weill-Fassina, 1993 ; Patrick, James, & Friend, 1996 ; Schraagen & Schaafstal, 1996).

On obtient un schéma de codage comportant deux grandes classes, contenant chacune plusieurs sous-classes. La première grande classe concerne l'activité de diagnostic et la deuxième – l'activité de réparation (fig. 8). Dans la classe **Diagnostic**, nous avons les catégories suivantes :

- **Détection et interprétation des symptômes de pannes** : contient des IC concernant la recherche et la compréhension des symptômes de pannes en vue de la formulation d'hypothèses sur leur(s) origine(s). Cette catégorie est divisée en :

- **Reproductibilité des symptômes** : le facteur critique principal est la (non)-reproductibilité de certains symptômes (ex. : "on n'a jamais eu le phénomène", "je ne l'ai jamais vu s'allumer, ce voyant", etc.).
- **Compréhension de l'origine de la panne à partir des symptômes** : le facteur critique principal est la clarté ou l'ambiguïté des symptômes (ex. : "il y avait ce qu'on appelle les traces de grippage sur la jupe...on le voyait à l'œil nu" ou "quand tu as une voiture qui cale, c'est très difficile de diagnostiquer la raison").
- **Familiarité des symptômes** : le facteur critique principal est le fait que les symptômes, sont soit bien, soit mal connus par les mécaniciens (ex. : "tout ce qui est voyant airbags, par exemple, ce sont des mauvais contacts... c'est facile à trouver, car on connaît").
- **Procédures de formulation d'hypothèses sur l'origine de la panne** : concerne le processus même de formulation et confirmation d'hypothèses de résolution de pannes, ainsi que la mise en épreuve de la solution choisie. Cette catégorie est divisée en :
- **Connaissances des procédures de résolution de pannes** : le facteur critique principal est une (mé)connaissance des procédures de formulation d'hypothèses sur l'origine de la panne. Cette catégorie a encore été sous divisée en "**Connaissances des procédures de résolution par expérience**" et "**Insuffisance des connaissances sur les procédures de résolution, acquises pendant les stages de formation**". Le facteur critique principal dans la première sous-catégorie s'exprime par des énoncés du type "je savais par expérience", "quand on dit facilement, c'est l'habitude". Le facteur critique principal dans la deuxième catégorie s'exprime par des énoncés tels "le véhicule vient de sortir...on ne le connaît pas beaucoup, on n'est pas formé", "je ne suis pas vraiment formé".

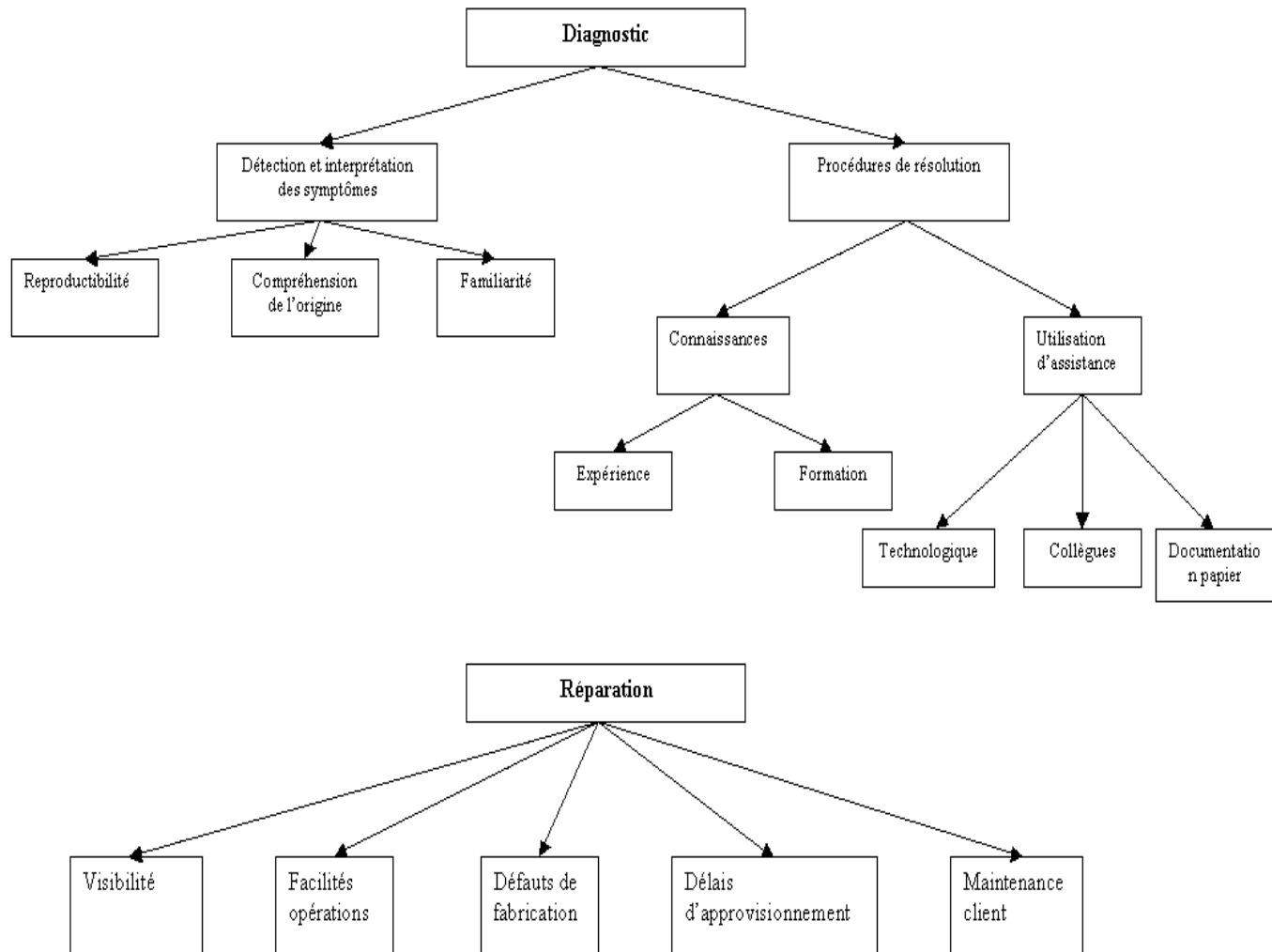


Fig. 8. Schéma de codage : représentation graphique

- **Utilisation d'une assistance** : le facteur critique principal est l'utilisation d'assistance à la formulation d'hypothèses sur l'origine de la panne. Cette catégorie a encore été sous divisée en "**Assistance technologique**", "**Collègues**" et "**Documentation technique en forme papier**". Les IC dans la première sous-catégorie concernent l'utilisation d'une assistance technologique (outils de diagnostic, station de commande de pièces de rechange, ligne d'assistance technique). Les récits comportent des énoncés du type : " l'outil de diag, il ne disait pas grand chose". Les IC dans la deuxième sous-catégorie expriment des situations, où les opérateurs imputent explicitement la facilité ou la difficulté de la réalisation de l'activité au recours à l'avis d'un collègue. Le facteur critique majeur

dans la troisième sous-catégorie est l'utilisation de la documentation de travail en forme papier (ex. : "il y a aussi les problèmes de schémas électriques").

La deuxième grande classe d'IC, appelée **Réparation**, contient les catégories suivantes :

- **Visibilité des pièces** : le facteur critique principal est une mauvaise visibilité des pièces du véhicule (ex. : "quand tu ne peux pas voir, tu ne peux pas le rentrer", parlant d'un câble).
- **Pénibilité des opérations** : le facteur critique principal est un effort physique excessif fourni par l'opérateur ou le nombre élevé d'opérations nécessaires. Ceci est exprimé typiquement par des adjectifs tels que "lourd", "costaud" et des énumérations d'étapes de travail. Dans ces cas, les mécaniciens font aussi référence au temps nécessaire à la réparation.
- **Défauts de fabrication** : le facteur critique principal est une pièce de rechange ou d'origine, défectueuse dès la fabrication (ex. : "j'avais une..hier, toute neuve, tout le faisceau était cramé, elle était arrivée comme ça" ou "c'était un problème de pièce défectueuse").
- **Délais d'approvisionnement avec des pièces de rechange** : le facteur critique principal est un retard au niveau de l'approvisionnement avec des pièces de rechange.
- **Suivi de la maintenance préventive du véhicule de la part du client** : le facteur critique principal est la maintenance préventive mal suivie par le client (ex. : "les clients ils vont à droite, à gauche...après, ils viennent et nous on doit refaire le boulot").

Le type du **composant** du véhicule, principalement concerné par la panne, a été également codé. Ainsi, nous avons des récits qui exposent des situations de travail sur des composants :

- purement mécaniques (ex. : plaquettes, certains composant du moteur, etc.),

- purement électriques (lampes, câbles, etc.),
- électroniques (multimédia, systèmes d'aide à la conduite, etc.) ou
- non identifiés (un certain nombre de récits concerne des pannes où les opérateurs n'ont même pas pu identifier l'origine de la panne et, par conséquent, la nature du système à diagnostiquer et / ou réparer).

Le degré de récence du véhicule a également été codé. Ainsi, les véhicules produits en 2002 et 2003 ont été identifiés comme "récents", tandis que les véhicules produits en 2000 et 2001 ont été identifiés comme "moins récents"²¹. Des exemples d'incidents ainsi codés sont présentés dans l'Annexe 2. Une étape intermédiaire du codage est présentée dans l'Annexe 7.

Validation du schéma de codage

Les résultats du codage ont été validés par un opérateur COTECH.

Analyses statistiques

Le schéma de codage a été appliqué sur les protocoles verbaux recueillis. Nous avons obtenu 7 variables catégorisées, résumant les caractéristiques de la situation de travail étudiée:

- "Fonction occupée dans l'atelier" à 2 modalités : MECA / COTECH ;
- "Difficulté perçue de la situation" à 2 modalités : Difficile / Facile ;
- "Résolution de la panne" à 2 modalités : Résolue / Non résolue ;
- "Activité critique exposée" à 2 modalités : Diagnostic / Réparation ;
- "Degré de récence du véhicule" à 2 modalités : Récent (datant de 2002 ou 2003) / Moins récent (datant de 2000 ou 2001) ;

²¹ Cette étude a été réalisée en 2003.

- "Type du composant concerné" à 4 modalités : Mécanique / Electronique / Electrique / Non identifié ;
- "Facteur principal de criticité" à 13 modalités : Reproductibilité des symptômes des pannes / Identification de leur origine / Familiarité / Connaissance des procédures de résolution des pannes par expérience / Connaissance des procédures de résolution des pannes grâce à la formation / Utilisation d'une assistance technologique / Utilisation d'une assistance de collègues / Utilisation d'une assistance documentaire / Visibilité des pièces / Facilité des opérations de réparation / Défauts de fabrication / Délais d'approvisionnement / Maintenance de la part du client.

Ensuite, nous avons effectué des analyses statistiques uni- et bi variés sur ces 7 variables catégorisées (fréquences, moyennes, taux de liaison, etc.). Enfin, pour mieux cerner les interactions entre les différentes caractéristiques de la situation de travail étudiée, nous avons opté pour une analyse multidimensionnelle des données. Dans le cas concret, une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) s'est avérée particulièrement pertinente vu la nature et la structure des données.

Les principaux avantages de l'utilisation d'une analyse des données multidimensionnelles dans le cadre de notre étude étaient la réduction du nombre élevé des variables qualitatives, de nature complexe, et la représentation de leurs interactions d'une manière synthétique.

4.1.2. Résultats

Nous ne présentons ici que les principaux résultats, pertinents pour l'analyse et la formalisation des besoins du futur système de RA. Les autres résultats de la recherche, ainsi que des détails sur les analyses statistiques des données ci-dessous sont exposés dans Anastassova (2003).

L'activité concerne surtout le diagnostic

Au total, nous avons recueilli 81 IC, dont 24 positifs et 57 négatifs (voir Annexe 3, tabl. 1 pour une répartition des effectifs des incidents positifs et négatifs en fonction du facteur principal de criticité). Dans tous ces IC, c'est l'activité de diagnostic qui est la plus souvent évoquée comme facteur critique. Environ 80 % des récits (N = 64) recueillis dans notre étude concernent l'activité de diagnostic de pannes, tandis que l'activité de réparation est évoquée dans seulement 20 % des cas (N= 17, Tabl. 4).

	Activité critique		Total
	Diagnostic	Réparation	
COTECH	50 (79 %)	13 (21 %)	63 (100%)
MECA	14 (78 %)	4 (22 %)	18 (100 %)
Total	64 (79 %)	17 (21 %)	81 (100 %)

Tabl. 4. Type de l'activité critique, exposée dans le récit, par rapport à la fonction de l'opérateur : distribution (effectifs et pourcentages)

Cette répartition est observée de façon identique quelle que soit la fonction occupée par les opérateurs (voir Annexe 3, tabl. 2 pour une répartition des effectifs des incidents positifs et négatifs par rapport à la fonction occupée). La distribution de l'activité critique est équivalente dans les discours des COTECH et des opérateurs moins qualifiés (79 % des discours des COTECH concernent le diagnostic et 21 % la réparation, contre 78 % et 22 %, respectivement chez les MECA).

Les composants électroniques et non identifiés s'associent à une non résolution de la panne

La nature du composant concerné par l'activité du technicien influence la résolution de la panne. Pour cerner la nature de ce lien, nous avons calculé des taux de liaison²² (Tabl. 5, voir Annexe 4, tabl. 1 pour les effectifs et la répartition). On constate que, généralement, dans les récits, la non identification du type du composant concerné s'associe à une non résolution de la panne (TDL = 3.05). Le diagnostic ou la réparation de composants électroniques s'associent également à une panne non résolue (TDL > 0.25).

Type du composant du véhicule concerné				
Taux de liaison	Mécanique	Electrique	Electronique	Non identifié
Pannes résolues	0.04	0.20	-0.07	-0.75
Pannes non résolues	-0.16	-0.81	0.27	3.05

Tabl. 5. Résolution de la panne en fonction du type de composant concerné : taux de liaison

Le travail sur des composants électriques conduit, en règle générale, à une résolution de la panne (fig. 9). Le même constat est valable pour les composants mécaniques (TDL positif mais inférieur à 0.25).

²² Les taux de liaisons (TDL) sont des écarts relatifs à l'indépendance. Ils s'obtiennent par une comparaison entre les données observées et celles, qui auraient été obtenues, si les deux variables étudiées étaient indépendantes. Il y a attraction lorsque le taux de liaison est positif et répulsions – lorsqu'il est négatif.

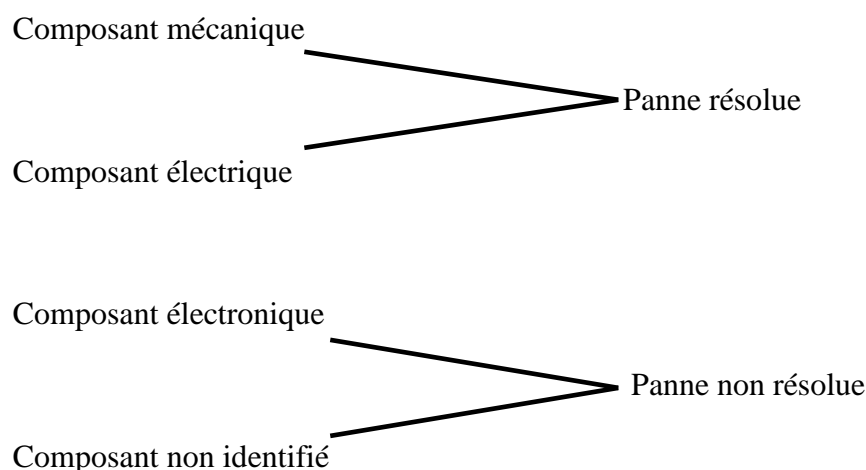


Fig. 9. Graphe des attractions entre la résolution de la panne et le type de composant concerné par l'activité du mécanicien

On observe une liaison forte entre le type de composant concerné par l'activité du mécanicien et le fait que la panne soit résolue ou non ($V^2 = 0.21$)²³.

L'insuffisance des connaissances acquises lors des stages de formation et l'aide des collègues s'associent à des composants électroniques

Toujours en ce qui concerne l'activité de diagnostic, on observe un lien entre le type du composant concerné et certains facteurs critiques de l'activité. Les taux de liaison indiquent que, dans les récits des opérateurs, les symptômes non reproductibles s'associent, en général, à des composants dont le type n'a pas pu être identifié (TDL = 6.09). Le tableau des effectifs, ainsi que le tableau de l'ensemble des taux de liaison sont présentés dans l'Annexe 4 (voir tabl. 2 et tabl. 3 respectivement).

²³ Le V^2 (V de Cramer) mesure la force de la liaison entre deux variables catégorisées dans un tableau de contingence. Il se calcule à l'aide du Φ^2 divisé par Φ^2_{max} , Φ^2_{max} étant la plus petite dimension du tableau moins 1. Le V de Cramer est compris entre 0 et 1.

En général, les symptômes familiers (TDL = 3.43), l'utilisation de documentation papier (TDL = 2.54) et la compréhension de l'origine des symptômes (TDL = 1.42) s'associent à des pannes sur des systèmes mécaniques.

Régulièrement, les opérateurs évoquent l'utilisation d'aides technologiques (TDL > 0.40), ainsi que l'utilisation de leur propre expérience de résolution de pannes (TDL > 0.40) quand ils parlent de composants électriques

En ce qui concerne les composants électroniques, en principe, ils sont évoqués en lien avec l'insuffisance des connaissances acquises lors des stages de formation (TDL > 0.40) et l'aide, demandée à des collègues (TDL > 0.40). On observe une liaison forte entre le type du composant concerné par l'activité et les facteurs critiques du diagnostic ($V^2 = 0.27$). Ces attractions sont résumées ci-dessous (fig. 10).

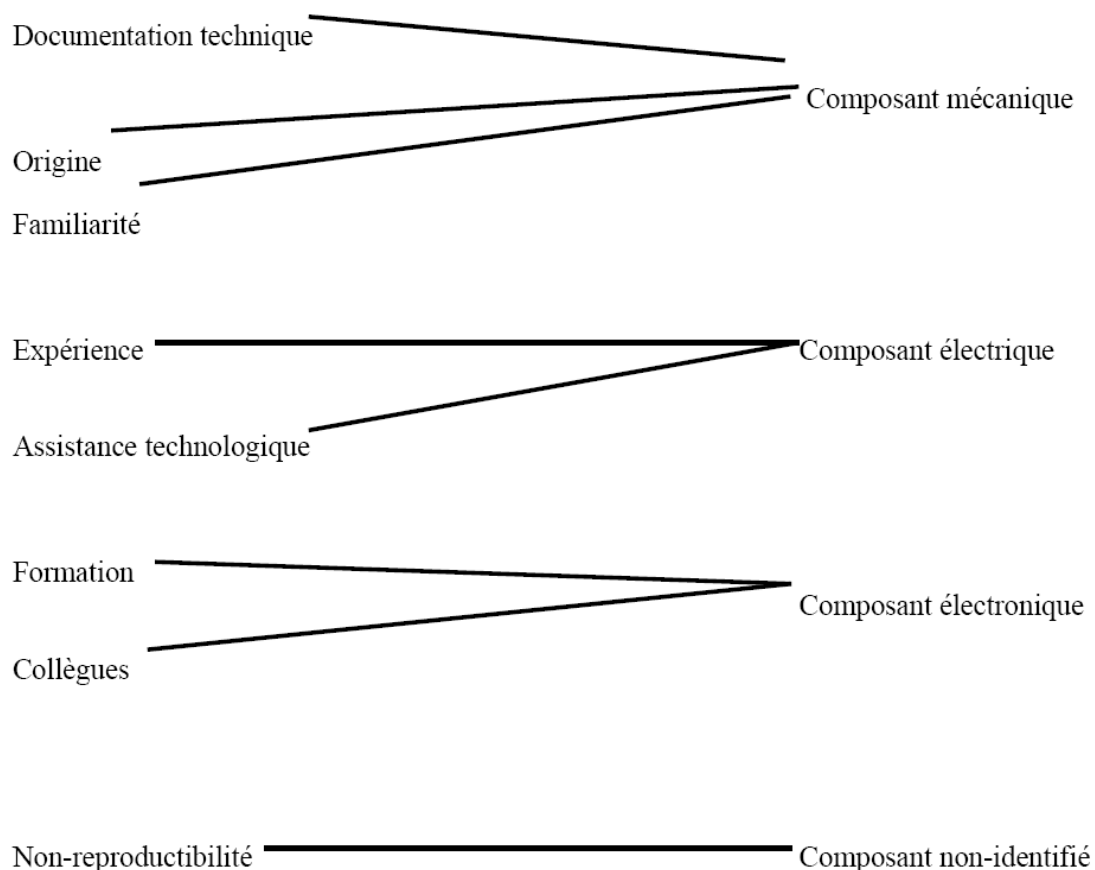


Fig. 10. Graphe des attractions entre le type du composant concerné par l'activité et les facteurs critiques du diagnostic

Les aides technologiques au diagnostic sont souvent associées à des pannes non résolues

Vingt-huit IC (35 % de l'ensemble des IC recueillis) concernent l'utilisation de diverses aides technologiques au diagnostic, tels un système-expert et une ligne d'assistance technique. Notons également que la majorité des pannes non résolues est associée à ces mêmes situations, qui impliquent l'utilisation d'aides technologiques (N = 9, 53 % de tous les IC relatifs à des pannes non résolues). Dans ces cas, les difficultés des techniciens sont principalement provoquées par un manque d'information dans la base de connaissances du système expert utilisé (N = 9, 43% des IC concernant l'utilisation d'aides technologiques) ou dans la réponse fournie par la ligne d'assistance technique (N=6, 29 % des IC dans ce groupe). Nous pouvons supposer qu'il s'agit ici de pannes rares ou récentes apparues sur le terrain, mais peu connues par la conception, qui, pour cette raison, n'ont pas été intégrées dans les aides technologiques.

Les techniciens évaluent le système-expert d'aide au diagnostic comme utile dans 24% des IC relatifs à l'utilisation d'aides technologiques (N=4). La ligne d'assistance technique est estimée être utile dans un seul incident exposé par l'un des techniciens interrogés.

La réparation : facteurs majeurs de criticité

Dans les récits des opérateurs, toutes les situations de réparation reportées ont été jugées comme difficiles (N = 17). Le facteur majeur de difficulté le plus souvent évoqué est la pénibilité physique des opérations de montage / démontage (41 % des cas). Viennent ensuite des défauts de pièces de rechange, présents dès la fabrication, des retards au niveau de l'approvisionnement et une maintenance préventive non suivie par les clients (Tabl. 6). La mauvaise visibilité des pièces n'est évoquée que dans une seule situation de réparation difficile.

	Pénibilité physique	Défauts de fabrication	Approvisio nnement (délais)	Maintenance (client)	Visibilité (pièce)	Total
Pannes difficiles	7 (41 %)	5 (29 %)	2 (12 %)	2 (12 %)	1 (6 %)	17 (100 %)

Tabl. 6. Les modalités du facteur majeur de criticité par rapport à la difficulté perçue des réparation (distribution : effectifs et pourcentages)

Analyse des données multidimensionnelles : synthèse des liens entre les variables étudiées

Afin de mieux explorer les interrelations qui existent entre les différentes variables étudiées et d'en proposer une représentation synthétique, nous avons réalisé une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC). L'AFC met en évidence l'existence de liaisons entre deux variables catégorisées dans un espace euclidien. Le tableau de données numériques (tableau de contingence) est constitué par les réponses des sujets sur les modalités des deux variables étudiées (pour plus de détails sur cette technique, voir Wolff, 2003).

Pour les besoins de notre étude nous avons construit un tableau de contingence, établi à partir de 2 variables catégorisées : la variable "Fonction occupée" à 2 modalités (COTECH et MECA) et la variable "Caractéristiques de l'incident rapporté" à 6 modalités (Facilité perçue de la panne (IC+ /IC-), Récence du véhicule, Type du composant concerné, Activité critique, c'est-à-dire diagnostic ou réparation, Résolution de la panne et Facteur principal de criticité).

Conformément à la technique d'analyse des données multidimensionnelles, nous avons retenus 3 axes factoriels qui résument 87 % de la variance. Deux nuages de points ont été examinés : d'une part, le nuage des variables et, d'autre part, le nuage des points moyens des modalités d'une variable particulièrement intéressante, à savoir le facteur principal de criticité de la situation. Ces deux nuages sont représentés dans l'Annexe 5 (fig. 1 et fig. 2 respectivement). Les données numériques utilisées pour interpréter les résultats de l'AFC sont présentées dans l'Annexe 6.

La fig. 11 est une représentation synthétique des "correspondances", c'est-à-dire les proximités qui existent entre les variables dans l'espace constitué par 2 des 3 axes factoriels retenus pour l'interprétation.

L'axe 1 représente une opposition entre le type du composant impliqué dans l'activité (composant électrique, mécanique, électronique ou non identifié) et le facteur principal de criticité, c'est-à-dire la difficulté / facilité majeure, identifiée dans la situation de travail exposée. Pour éclaircir ces oppositions, nous retournons vers les incidents critiques, rapportés par les techniciens. Cet axe exprime la distinction suivante : d'une part, on a des situations de diagnostic incertain, où l'origine des symptômes a été perçue comme difficile à comprendre, concernant des composants non identifiés. D'autre part, on a des difficultés provoquées par des facteurs socio organisationnels et des situations de réparation problématique, concernant des composants mécaniques ou électriques. Nous pouvons constater que cet axe exprime ainsi une opposition entre ce qui est mal connu, éventuellement nouveau, et ce qui est bien connu, mais difficilement réalisable.

L'axe 2 illustre une opposition entre le type de composant diagnostiqué ou réparé (système électrique, mécanique, électronique et non identifié) et le caractère facile ou difficile de la situation (c'est-à-dire la qualification de l'IC comme positif ou négatif). On voit se dessiner une opposition entre des situations de diagnostic ou de réparation jugées particulièrement difficiles, et ceci sur des systèmes électroniques, contre des situations de diagnostic et de réparation plutôt faciles, sur des composants de tout type. En généralisant ce résultat, nous pouvons constater qu'une des difficultés majeures de l'activité des techniciens en maintenance est le travail sur des systèmes électroniques.

Sur **l'axe 3** (non représenté sur fig. 11) sont opposés le degré de récence du véhicule et la fonction occupée dans l'atelier. L'analyse des IC montre qu'il s'agit ici d'une opposition entre des pannes sur des véhicules récents, diagnostiquées et/ou réparées par des mécaniciens moins qualifiés, et des IC sur des véhicules moins récents, diagnostiquées et/ou réparées par des COTECH. Ainsi, on pourrait interpréter cet axe comme révélateur de la différenciation des fonctions entre COTECH et MECA (elle-même révélatrice de différences du degré d'expérience professionnelle).

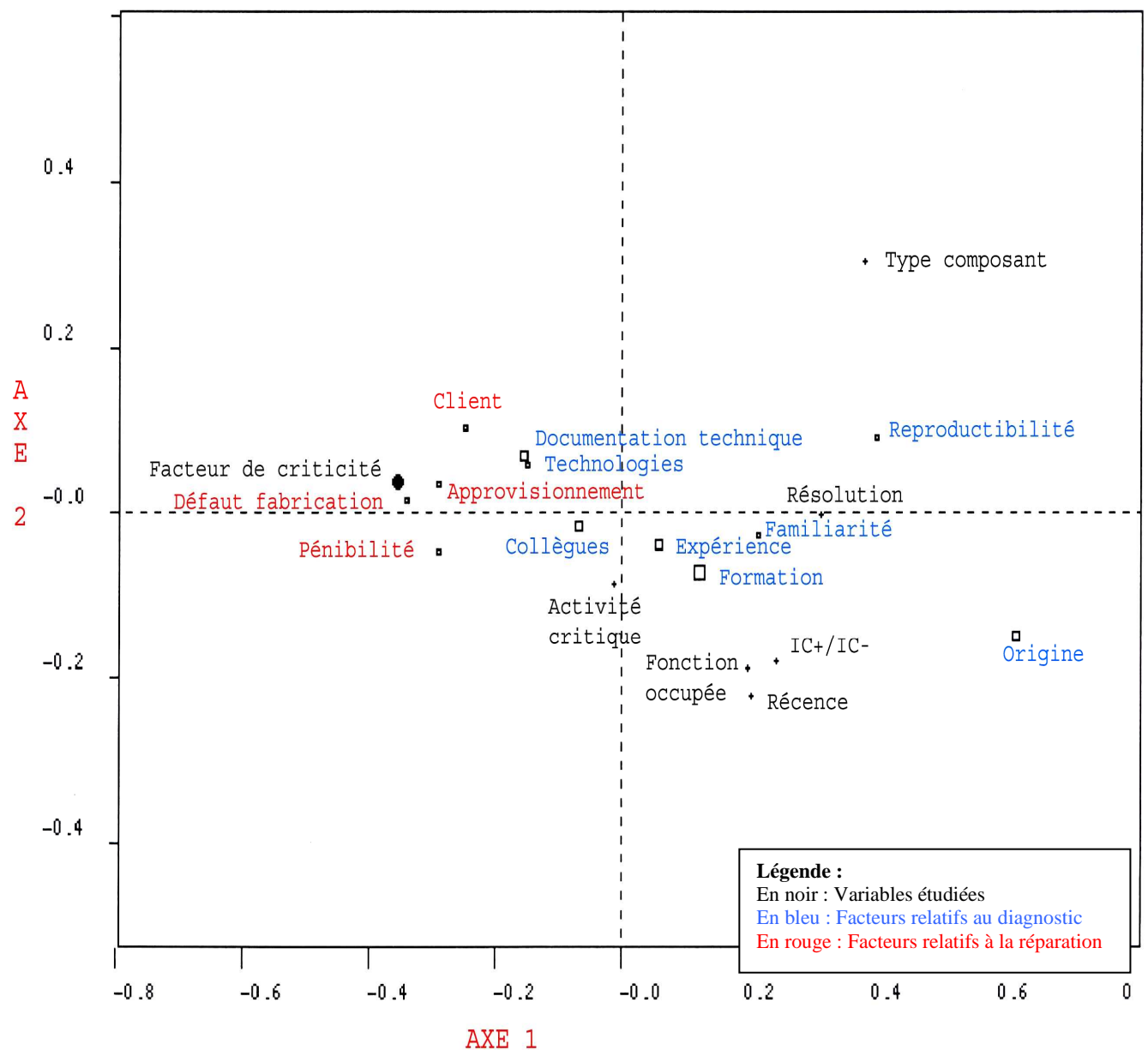


Fig. 11. Nuage des points moyens : facteurs critiques de l'activité des mécaniciens

D'une manière générale, on peut également constater que les facteurs critiques liés à la réparation s'opposent à ceux liés au diagnostic (fig. 11). L'opposition entre les deux groupes de facteurs est particulièrement visible sur l'axe 1.

4.1.3. Limites de l'étude

Cette recherche a permis de cerner plusieurs aspects problématiques de la maintenance de véhicules récents (par exemple, diagnostic de l'électronique, lacunes de certaines connaissances enseignées lors des stages de formation). La technique des incidents critiques nous a permis de cerner rapidement les problèmes dans la situation de travail étudiée. Toutefois, l'utilisation de cette technique a limité l'étude à des situations déviant plus ou moins de l'activité routinière des sujets. En outre, le recueil des données a été réalisé par des entretiens, ce qui est une méthode de recueil indirect des aspects problématiques de la situation de travail étudiée.

4.1.4. Conclusion et perspectives

Cette première étude a été centrée sur l'activité des techniciens en maintenance dans le contexte des dernières évolutions de la conception automobile. L'objectif industriel était d'évaluer l'applicabilité d'une future assistance utilisant la RA. Un préalable à cet objectif était d'étudier les difficultés rencontrées par les opérateurs et leurs besoins éventuels en aides techniques utilisables pendant l'activité, ainsi que d'éventuels besoins de formation. Pour cela, la méthode des incidents critiques, adaptée à ce type d'activité professionnelle, nous a semblé particulièrement pertinente.

Les résultats de la recherche montrent que l'activité de diagnostic de pannes occupe une place centrale dans les récits des techniciens, aussi bien COTECH que MECA. Les aspects relatifs à la réparation sont exposés moins souvent. De surcroît, la mauvaise visibilité des pièces pendant le montage/démontage n'est pas le principal facteur critique de l'activité de réparation. Au contraire, il n'apparaît que dans un seul récit. Or, montrer ce qui n'est pas directement et facilement visible est l'une des principales propriétés et premiers avantages de la RA, dont l'emploi est envisagé par les demandeurs avant notre recherche ergonomique sur les besoins d'assistance technologique. Rappelons à cet égard que, parmi les critères ergonomiques d'un « bon produit », le critère d'utilité précède logiquement le critère d'utilisabilité !

Les opérateurs rapportent principalement des difficultés (et, implicitement, des besoins d'assistance) pour réaliser le diagnostic de composants électroniques et non identifiés. Ces

difficultés de diagnostic aboutissent souvent à un échec de résolution de la panne. Les problèmes concernent le plus souvent les nouveaux modèles de véhicules. Bien que suggérée par d'autres auteurs (par exemple, Barkai, 2001), cette caractéristique de l'activité des mécaniciens aujourd'hui n'avait pas reçu d'évidences empiriques dans le domaine de la maintenance automobile.

Ainsi, les résultats empiriques de cette analyse des besoins sont une aide à la détermination des fonctions principales d'assistance du futur système de RA, qui pourrait être utilisé en tant qu'aide au diagnostic en atelier, concernant surtout la compréhension des systèmes électroniques introduits dans les nouveaux modèles de véhicules.

La recherche montre également que les difficultés de diagnostic de composants électroniques sont souvent attribuées à une insuffisance de connaissances acquises lors des stages de formation. En outre, dans la majorité des cas, c'est pour ce type de problèmes que les techniciens disent demander l'aide d'un collègue. Une explication possible de ce résultat est à rechercher dans certaines limitations des outils technologiques d'assistance utilisés actuellement, qui ne fournissent pas toujours les informations nécessaires, notamment quand il s'agit de pannes peu connues par la conception. D'autres explications possibles pourraient être liées aux stages de formation dans le domaine de la maintenance automobile. Seraient en cause les méthodes et le contenu de ces stages, qui ne seraient pas suffisamment axés sur l'explicitation du fonctionnement des systèmes électroniques et des démarches de diagnostic associées ou sur l'architecture des nouveaux modèles. Une autre hypothèse possible est qu'ils seraient trop courts pour permettre de réaliser un programme de formation complet et efficace. Une autre hypothèse encore est que la formation de base des mécaniciens, qui est principalement en mécanique et/ou électricité, ne leur permettrait pas d'intégrer et opérationnaliser facilement des concepts nouveaux du domaine électronique. Les résultats de notre première étude ergonomique ne peuvent ni confirmer, ni infirmer ces hypothèses, mais incitent à réaliser une prolongation d'étude sur l'organisation des stages de formation. C'est, en effet, l'objet de l'étude ci-après.

4.2. Étude 2 : Entretiens avec des acteurs de la formation

La formation à la maintenance automobile dans le contexte des évolutions de la conception de véhicules

Malgré les efforts des constructeurs automobiles, la formation des mécaniciens semble assez problématique aujourd'hui. On en trouve un écho dans diverses réflexions dans la littérature tant scientifique que professionnelle. Parmi les difficultés majeures, notamment en ce qui concerne les nouveaux modèles de véhicules, on peut relever au travers de diverses publications :

- Les stages de formation sont estimés trop courts par une grande partie des mécaniciens (Service Tech Magazine, 2001) ;
- Dans certains cas, la formation n'est pas mise à jour à cause de l'évolution rapide et fréquente des caractéristiques des véhicules. Pour cette raison, les mécaniciens acquièrent constamment de nouvelles connaissances, qui sont peu stabilisées. Cette tendance est particulièrement prononcée la première année suivant la commercialisation du nouveau modèle de véhicule (Barkai, 2001 ; Mulholland, Ivergard, & Kirk, 2005).
- Souvent, même correctement mise à jour, les stages arrivent trop tôt ou trop tard par rapport aux exigences de la maintenance sur le terrain (Saint-Venant, Closset, Cottaz, Dubois, Faurie, & Fériol, 2002).
- La formation à la maintenance automobile se fait majoritairement sur le tas. Or, les ressources organisationnelles pour formaliser, accumuler et diffuser ces savoirs ne sont pas mobilisées (Amiel, Tricot, & Mariné, 2004 ; Barkai, op. cit.).
- L'activité de diagnostic, telle qu'elle se présente dans les conditions actuelles de maintenance, n'est pas étudiée et formalisée pour être intégrée dans la conception des programmes et supports de formation.

Les stages de formation chez Renault, demandeur des recherches ergonomiques, sont soumis à l'ensemble des contraintes exposées ci-dessus. Tout d'abord, la conception et

l'animation des stages impliquent des acteurs de différents services et équipes, travaillant avec des ressources, des buts et des délais divers (fig. 12).

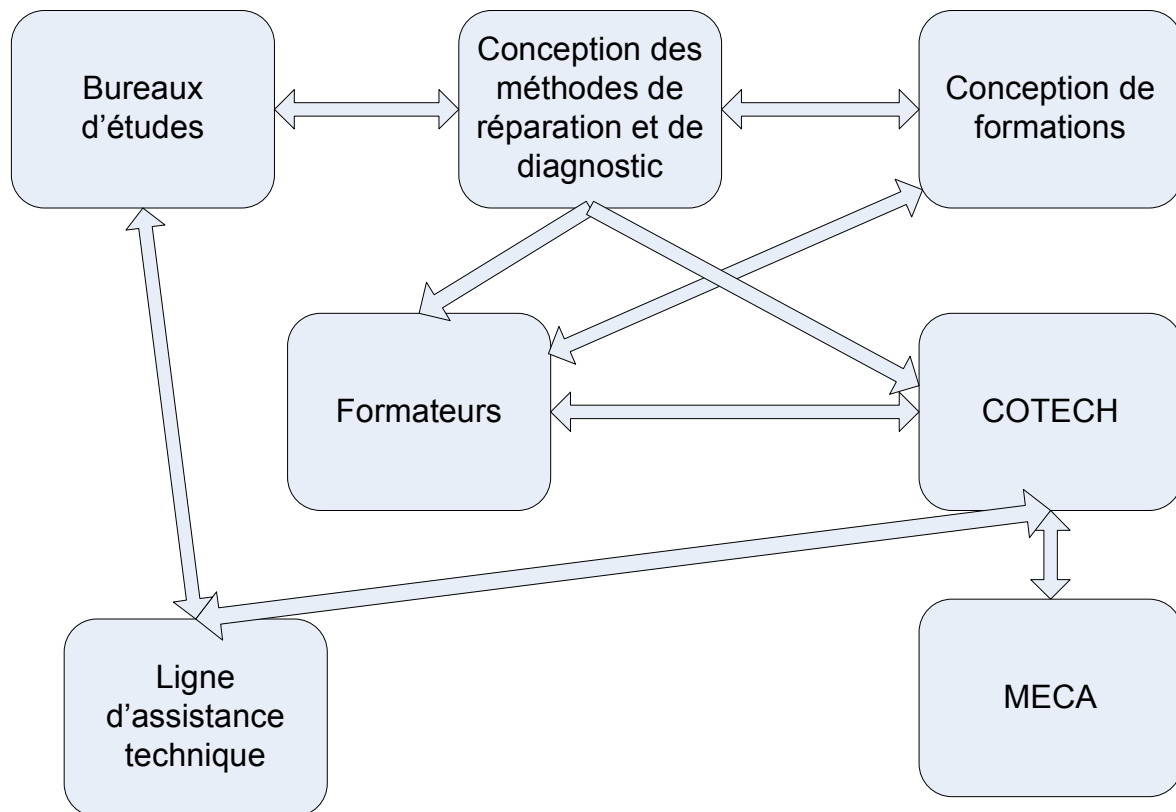


Fig. 12. Schématisation du processus d'organisation des stages de formation sur les nouveaux modèles de véhicules

D'une manière générale, les bureaux d'études, qui conçoivent différents modules fonctionnels d'un véhicule, transmettent l'information technique au service de conception des méthodes de réparation et de diagnostic, ainsi qu'aux opérateurs travaillant au centre qui assure l'assistance technique²⁴. Les opérateurs du service de conception des méthodes élaborent une première version des modes opératoires de montage et de démontage lors d'une intervention sur le produit. Les méthodes proposées intègrent de l'information sur les opérations à réaliser, leur séquence, l'accessibilité des pièces, les trajectoires à suivre, les outils à utiliser, etc. Le timing pour chaque opération est aussi calculé. Ensuite, les méthodes ainsi rédigées sont transmises aux concepteurs de formations, qui s'en servent pour alimenter

²⁴ Il s'agit de la ligne d'assistance technique mentionnée dans la recherche utilisant la technique des incidents techniques.

le contenu pédagogique des supports de formation. Enfin, l'information arrive jusqu'aux mécaniciens en atelier par deux moyens : grâce à la documentation technique, utilisée quotidiennement, et grâce aux informations présentées par les formateurs lors des stages au centre de formation. Aussi, il y a des retours constants d'information tout au long de la chaîne d'organisation de la formation, notamment en ce qui concerne la recherche de méthodes de montage et de démontage et de diagnostic. La réduction du nombre des prototypes en amont du processus de conception et le raccourcissement des délais de production et les problèmes ont sensiblement compliqué cette recherche de méthodes.

Une autre difficulté réside dans le fait que les stages de formation deviennent de plus en plus courts. On remarque également une tendance de laisser la formation se faire rapidement sur le poste de travail. Ainsi, tout stage de formation comporte deux étapes principales. Dans un premier temps, environ 6 mois avant la commercialisation du produit, des supports de formation (des manuels, des cassettes VHS, des CD, des DVD, etc.), qui présentent les caractéristiques générales du produit, sont distribués aux opérateurs COTECH dans les ateliers afin qu'ils s'autoforment pendant leurs horaires habituels de travail. Par la suite, ils doivent également former leurs collègues non COTECH (voir fig. 12). Des séances de formation spécifiques sont prévues dans certains ateliers, mais dans la majorité des cas, la formation par le COTECH se fait d'une manière plus informelle.

Dans un deuxième temps, au moment du lancement commercial du produit, des COTECH (un seul par atelier) sont convoqués aux centres de formation pour suivre des stages animés par des formateurs qui, en général, sont eux-mêmes anciens COTECH. Les stages en centre de formation se concentrent sur des aspects particulièrement importants du diagnostic et de la réparation des véhicules. Ils comportent des cours en salle et des exercices pratiques sur des pannes simulées en atelier. Pour les différents groupes de stagiaires, les stages commencent environ un mois avant le lancement commercial du produit et se terminent environ un mois après. Il se peut que certains stagiaires, notamment ceux travaillant dans des structures de grande taille, aient déjà eu un premier contact avec le produit sorti en présérie, par exemple. En revanche, d'autres stagiaires de petits garages travailleront sur le nouveau produit beaucoup plus tard, quand celui-ci sera bien maîtrisé, puisqu'au lancement commercial d'un produit, les petites structures ne disposent pas toujours de tous les outils nécessaires pour diagnostiquer et réparer les nouveaux modèles.

A cause de ces caractéristiques nouvelles, la formation des techniciens en maintenance automobile aujourd'hui ne pourrait plus être interprétée comme un système d'apprentissage bien structuré et relativement fermé. Par conséquent, l'apprentissage dans ce contexte ne pourrait plus être étudié uniquement au moyen d'expérimentations contrôlées des représentations et du processus d'acquisition de connaissances par les apprenants, comme cela a été fait auparavant (par exemple, Bonnet, 1975). Nous voyons également une nécessité d'analyse de l'activité de formation telle qu'elle est mise en œuvre sur le terrain, dans des conditions réelles de travail. Nos recherches présentées ci-après, ainsi que dans le chapitre suivant sont une contribution en ce sens.

4.2.1. Méthodologie

Sujets

L'étude a été réalisée au Centre de Formation Régional (CFR) d'Ile-de-France (IDF) et a porté sur 3 groupes de sujets :

- **6 formateurs** âgés de 30 à 53 ans ($M = 40$, $Ety = 11.2$), qui ont une expérience moyenne de 5 ans en tant que formateurs ($Min = 1$, $Mx = 11$) et une expérience moyenne de 14 ans en tant que mécaniciens ($Min = 3$, $Max = 27$).
- **11 stagiaires** âgés de 20 à 51 ans ($M = 39$, $Ety = 9.8$), qui ont une expérience moyenne de 17 ans en tant que mécaniciens ($Min = 3$, $Max = 37$)²⁵ ;
- **6 concepteurs de formations** âgés de 25 à 40 ans ($M = 32$, $Ety = 5.6$), qui ont une expérience moyenne de 4 ans en tant que concepteurs de formations ($Min = 1$, $Max = 6$) et une expérience antérieure (en tant que mécaniciens et/ou formateurs) de 4 ans en moyenne ($Min = 0$, $Max = 6$).

²⁵ Il s'agit des 11 mécaniciens interrogés dans le cadre de l'étude utilisant la TIC. Les questions sur leurs impressions des sessions de formation ont été posées à la fin des entretiens.

Procédure

L'étude a été centrée sur les formations aux nouveaux produits (véhicules et systèmes techniques), puisque la recherche précédente avait montré que ceux-ci constituaient une des difficultés majeures du travail des mécaniciens.

La technique de recueil utilisée consiste en des entretiens semi dirigés. Après une brève présentation orale des objectifs du projet et de la technologie à concevoir, les stagiaires ont été interrogés sur les sessions de formation (utilité, problèmes rencontrés). Les questions posées aux formateurs et aux concepteurs de formations concernaient les difficultés majeures rencontrées dans leur activité, ainsi que les ressources qu'ils mettent devant ces difficultés. Les formateurs et les concepteurs de formations ont également été interrogés sur les éventuelles applications de la RA dans leur activité. Les objectifs du projet et la RA ont été succinctement présentés avant les entretiens. Des questions concernant les difficultés des stagiaires ont été posées aux formateurs. Nous n'avons pas interrogés les concepteurs de formations sur cet aspect, puisqu'ils n'entrent pas en contact direct avec les stagiaires (voir grilles d'entretien dans les Annexes 8 et 9).

Les entretiens ont été menés sur le poste de travail où se fait la formation, pendant les horaires habituels de travail. Nous avons obtenu 23 entretiens, d'une durée totale de 8h25, tous intégralement enregistrés et retranscrits par la suite. La durée des entretiens variait de 10 min à 45 min ($M = 19$, $Ety = 10.9$). Comme dans l'étude précédente, l'anonymat des opérateurs et la confidentialité des informations ont été garantis et respectés.

Analyse des données

Les protocoles verbaux obtenus ont été analysés au moyen d'une analyse thématique du contenu (Ericsson & Simon, 1999). L'unité d'analyse correspond à une idée fédératrice, exprimée dans une ou plusieurs phrases (voir l'Annexe 10 pour un exemple de codage des données brutes). Les schémas de codage pour chaque population de sujets interviewés sont présentés ci-après.

Les formateurs

Les thèmes centraux évoqués par les formateurs dans les 188 unités thématiques ainsi construites concernent :

- des difficultés de préparation des formations,
- des difficultés d'animation des formations,
- des difficultés de communication avec les autres services de l'entreprise,
- certaines attitudes à l'égard la technologie.

Sont évoquées également les ressources utilisées pour faire face à ces difficultés. La notion de *ressources pédagogiques* (ou *éducatives*) est fréquemment utilisée dans le domaine des technologies pour l'apprentissage. Deux interprétations principales de ce concept coexistent. La première interprétation fait référence à l'ensemble des moyens physiques qui facilitent l'apprentissage pour l'apprenant, d'une part, et la conduite de l'interaction didactique pour le formateur, d'autre part, dans un contexte pédagogique donné (Burkhardt, Lourdeaux, & Mellet d'Huart, 2003). La deuxième interprétation est plus large : elle concerne tout type d'information, d'objet, d'outil et de pratique qui influence les interactions dans un contexte d'apprentissage (Roth, 1996). Notre analyse des entretiens prend en compte ces deux conceptions. Par conséquent, nous divisons schématiquement les ressources pédagogiques en deux groupes, à savoir :

- des ressources interactionnelles (ex. : informations obtenues des collègues et des stagiaires),
- des ressources physiques (ex. : véhicules et pièces didactiques).

Une dernière partie des thèmes centraux fait référence aux *suggestions* des formateurs concernant les fonctionnalités du futur système de RA, ainsi qu'à leurs propositions pour une meilleure organisation de la formation. Les attitudes des opérateurs envers une future aide technologique apparaissent également dans les entretiens. En outre, les formateurs exposent leur vision des difficultés rencontrées par les stagiaires.

Les concepteurs de formations

Les thèmes centraux évoqués par les concepteurs de formations sont identifiés à partir de 175 unités thématiques. Le principe de codage est similaire à celui adopté pour l'analyse des protocoles verbaux des formateurs. Sont identifiées :

- des difficultés de conception des formations (ex. : qualité des informations fournies par les autres services de l'entreprise, contraintes de temps) ;
- des ressources interactionnelles et physiques utilisées pour résoudre ces problèmes (ex. : expérience et connaissances personnelles, véhicules didactiques) ;
- des suggestions concernant les applications possibles de la RA et l'organisation actuelle de conception de formations.

Les stagiaires

Deux thèmes principaux apparaissent dans les entretiens des opérateurs en formation, à savoir :

- la durée des stages de formation,
- la qualité du contenu pédagogique, présenté par le tuteur ou exposé dans les documents pédagogiques.

Validation du schéma de codage

Les résultats du codage ont été validés par le responsable du service « Conception de formations », ainsi que lors d'une réunion avec les formateurs.

4.2.2. Résultats²⁶

Les difficultés, rencontrées pendant la préparation et l'animation des formations reviennent assez souvent dans le discours des opérateurs (45% de la totalité des unités thématiques, N = 85 sur 188). Les formateurs relatent des difficultés à préparer les sessions de formation, des difficultés à les animer et des difficultés à communiquer avec certains services de l'entreprise.

Difficultés des formateurs : préparation des formations

Les difficultés de préparation des formations sont exprimées dans 45% des unités thématiques concernant des difficultés en général (N = 38 sur 85). La figure 13 montre la répartition des origines des problèmes. Le problème le plus souvent relaté concerne les nombreuses versions différentes des véhicules utilisés (1) par les concepteurs de formations pour la rédaction de documents pédagogiques, (2) par les formateurs pour provoquer des pannes didactiques et animer la formation et, enfin, (3) par les clients finaux et les mécaniciens. Les difficultés dues à des versions différentes des produits représentent 34% des difficultés pendant la phase de préparation des formations (N = 13 sur 38). Ensuite, dans 29% des cas (N = 11 sur 38), les formateurs relatent des difficultés dues à des retards de livraisons des matériels pédagogiques (véhicules, documents, etc.). De plus, les formateurs estiment leur propre formation sur les nouveaux modèles insuffisante (N = 10 sur 38, soit 26% des difficultés de préparation). Également, ils estiment qu'il est difficile de provoquer certaines pannes telles qu'elles auraient apparues sur le terrain, sans pour autant détruire les véhicules didactiques (N = 4 sur 38, soit 11% des difficultés de préparation).

²⁶ Ces résultats sont décrits d'une manière plus détaillée dans Anastassova (2005a).

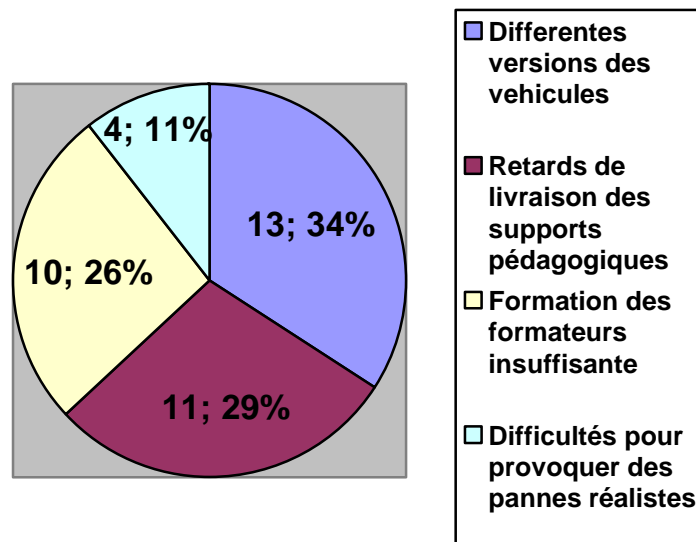


Fig. 13. Difficultés pendant la préparation des formations : effectifs et fréquences

Difficultés des formateurs : animation des formations

Dans les entretiens, les difficultés concernant l'animation des sessions de formation apparaissent un peu plus souvent que celles concernant leur préparation (dans 46% des cas, N= 39 sur 85). Dans ce groupe, la difficulté principale est l'insuffisance de pièces didactiques facilement utilisables (c'est-à-dire prédécoupées, prédémontées, etc.). Cette difficulté est évoquée dans 62% des unités verbales concernant des difficultés d'animation (N = 24 sur 39, voir fig. 14). D'autres problèmes, moins fréquemment évoqués, sont dus à l'imprécision de certaines informations dans les documents pédagogiques (N = 11 sur 39, soit 28% des unités verbales) et l'impression des formateurs que les formations qu'ils animent ne sont pas suffisamment approfondies, notamment en ce qui concerne le fonctionnement de l'électronique (N = 4 sur 39, soit 10% des unités verbales). La répartition des difficultés d'animation des stages est représentée sur la figure 14.

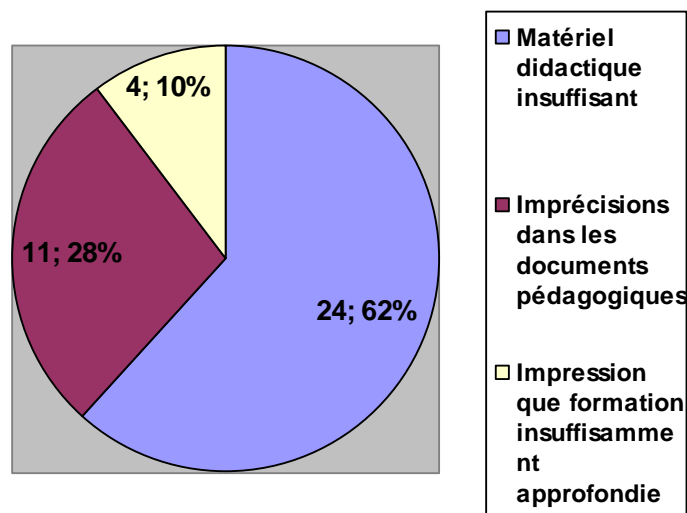


Fig. 14. Difficultés pendant l'animation des formations : effectifs et fréquences

Difficultés des formateurs : communication

Les formateurs rapportent des difficultés de communication avec les autres services de l'entreprise (en particulier, avec les concepteurs de formations). Ces difficultés sont exprimées 8 fois (9% des difficultés relevées à partir des 85 unités thématiques).

Difficultés des concepteurs de formations : disponibilité et qualité des informations

Des difficultés apparaissent dans 59% des unités thématiques, constituées à partir des entretiens avec les concepteurs de formations (N = 103 sur 175). Les problèmes concernent en premier lieu la disponibilité et la qualité des informations utilisées afin de créer des supports de formation (N = 61 sur 103, soit 59% des unités thématiques). Le processus de recherche d'information auprès d'autres services de l'entreprise (par exemple, bureaux d'études, services de conception des méthodes de réparation et de diagnostic) est évalué comme le plus problématique (N = 25 sur 61, soit 41% des difficultés dans ce groupe). La qualité de l'information (actualité, pertinence, exactitude) vient en deuxième position (N = 19 sur 61, soit 31%). Les concepteurs de formations évoquent également des difficultés à trier, organiser et présenter les informations obtenues dans une forme facilement utilisable par les formateurs (N = 11 sur 61, soit 18%), ainsi qu'une certaine insuffisance de l'information sur le

fonctionnement de l'électronique (N = 6 sur 61, soit 10%). La répartition des difficultés liées à la qualité de l'information est représentée sur la figure 15.

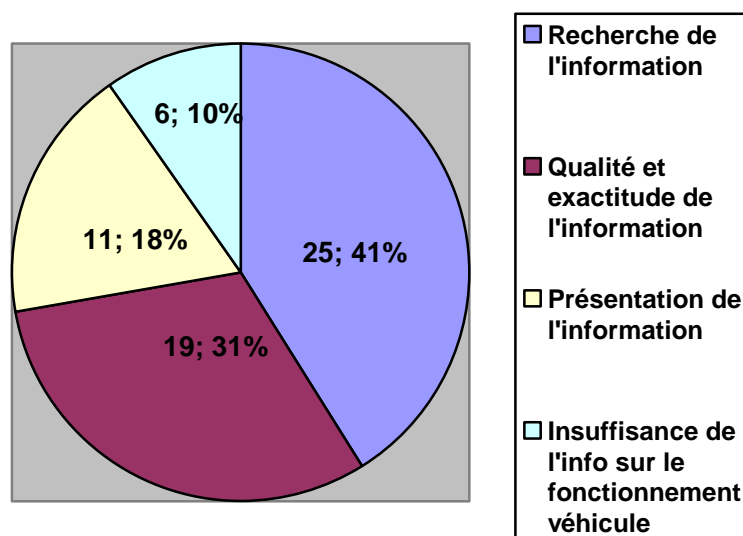


Fig. 15. Difficultés liées à la qualité et la disponibilité des informations : effectifs et fréquences

Difficultés des concepteurs de formations : matériel et temps

Les concepteurs révèlent également des difficultés provoquées par des contraintes matérielles, ainsi que des contraintes de temps (N = 42 sur 103, soit 41% de l'ensemble des difficultés). La figure 16 montre que les contraintes de temps sont exposées le plus souvent (N = 18 sur 42, soit 42%). Viennent ensuite des problèmes liés à l'insuffisance des véhicules réels (N = 12 sur 42, soit environ un tiers des difficultés) et les limitations des logiciels de traitement de texte utilisés pour la conception des formations (N = 12 sur 42, soit environ un tiers des difficultés).

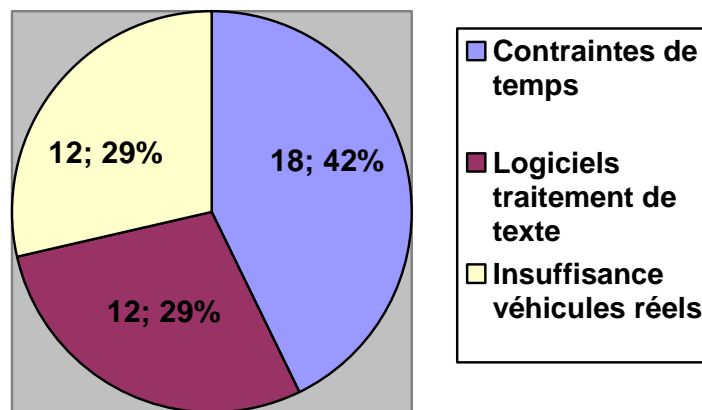


Fig. 16. Difficultés matérielles et de temps : effectifs et fréquences

Difficultés des stagiaires

Du point de vue des formateurs, les difficultés des stagiaires sont les suivantes : formation insuffisamment approfondie (N = 9 sur 13, soit 69% des unités thématiques concernant les difficultés des formés) ; communication et prise en compte des exigences du client sur le terrain (N = 3 sur 13, soit 23%) ; insuffisance des outils d'assistance en atelier (N= 1 sur 13, soit environ 8%).

Les stagiaires eux-mêmes soulignent les facteurs de difficulté suivants : sessions de formation trop courtes (dans 6 des 11 cas) : orientation trop théorique de l'enseignement (2 des 11 cas). Notons que dans 3 des entretiens, les stagiaires n'évoquent aucun problème particulier. Ils semblent satisfaits des formations telles qu'elles sont organisées aujourd'hui.

Utilisation de ressources par les formateurs

Dans leurs entretiens, les formateurs évoquent, dans un tiers des unités verbales, les ressources qu'ils utilisent afin de faire face aux difficultés décrites plus haut. Deux grandes catégories de ressources utilisées peuvent être distinguées, à savoir les ressources physiques (par exemple les véhicules et pièces didactiques et les documents pédagogiques fournis par les concepteurs de formations) et les ressources interactionnelles (par exemple, les informations obtenues des concepteurs de formations, des collègues, des stagiaires).

L'utilisation des ressources interactionnelles est évoquée plus souvent par les formateurs (N = 35 sur 60, soit 58% des unités verbales concernant les ressources) que celle des ressources physiques. Dans le groupe des ressources interactionnelles, la ressource évoquée le plus souvent est l'information fournie par les concepteurs de formations. Elle est soulignée dans 35% des unités verbales concernant des ressources interactionnelles (N = 12 sur 35, fig. 17). Dans 29% des unités thématiques, les formateurs disent préparer méthodiquement leurs cours (N = 10 sur 35). Les stagiaires (N = 7 sur 35, soit 20%) et les collègues (N = 6 sur 35, soit 17%) sont également jugés comme des ressources importantes pour la préparation et le bon déroulement des formations.

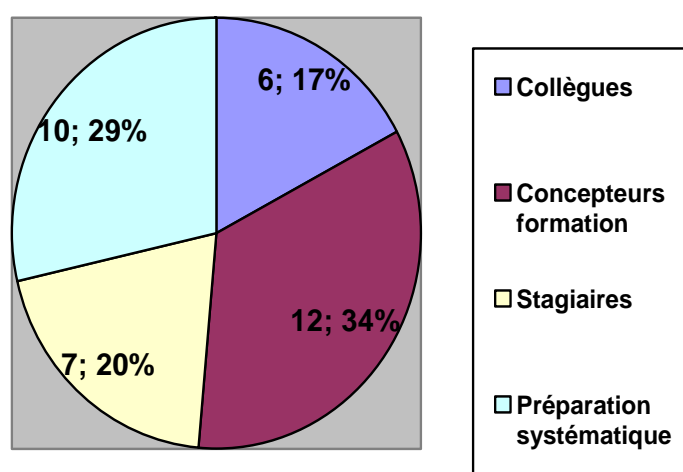


Fig. 17. Ressources interactionnelles utilisées par les formateurs : fréquences et pourcentages

L'utilisation de ressources physiques a été évoquée dans 42% des unités verbales concernant les ressources (N = 25 sur 60). Les ressources physiques dites les plus utilisées sont les véhicules didactiques disponibles au centre de formation (N = 10 sur 25, soit 40% des unités verbales concernant les ressources physiques). Les formateurs rapportent utiliser également la documentation technique disponible (N = 9 sur 25, soit 36%) et des pièces didactiques soit en forme physique, soit en forme d'images (N = 6 sur 25, soit 24%, voir fig. 18 pour la répartition).

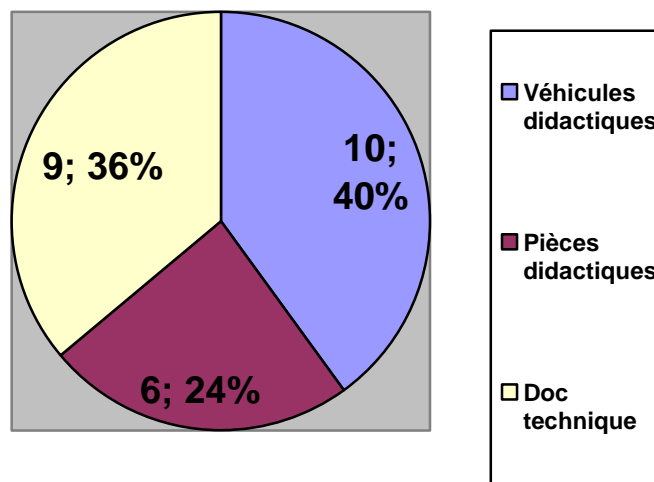


Fig. 18. Ressources physiques utilisées par les formateurs : fréquences et pourcentages

Utilisation des ressources par les concepteurs de formations

Comme leurs collègues formateurs, les concepteurs de formations utilisent des ressources physiques et des ressources interactionnelles pour résoudre les problèmes quotidiens. L'utilisation de ressources est évoquée dans 34% des unités thématiques (N = 60 sur 175). L'utilisation de ressources interactionnelles est évoquée plus souvent que celle de ressources physiques (dans 41 sur 60 cas, soit 68% des unités thématiques relatives à l'utilisation de ressources,). Les concepteurs disent utiliser le plus souvent leur propre expérience et leurs connaissances antérieures (N = 17 sur 41, soit 41% des unités verbales concernant les ressources interactionnelles), ainsi que l'information fournie par les bureaux d'études (N = 16 sur 41, soit 39%, voir fig. 19 pour la répartition).

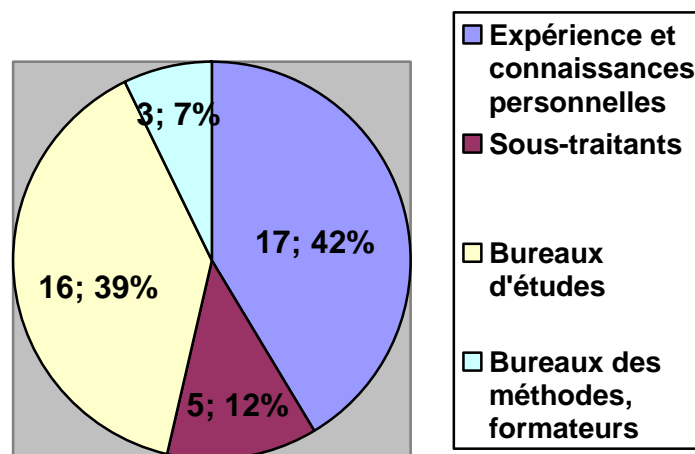


Fig. 19. Ressources interactionnelles, utilisées par les concepteurs : fréquences et pourcentages

Les services de sous-traitants, les informations remontées par les formateurs et celles des bureaux de conception de méthodes de réparation sont également évalués, bien que moins souvent, comme une aide précieuse (dans 12 % et 7% des unités relatives aux ressources interactionnelles, respectivement).

L'utilisation de ressources physiques est présente dans environ un tiers (32%) des unités constituées à partir des entretiens avec des concepteurs de formations (N = 19). La ressource physique la plus souvent évoquée est l'utilisation de trames prédéfinies pour la conception des supports de formation (N = 9 sur 19, soit 47% des unités thématiques relatives à l'utilisation de ressources physiques). Viennent ensuite les véhicules physiques, qui servent à vérifier l'information fournie par les bureaux d'études (N = 7 sur 19, soit 37%) et des photos de pièces de rechange (N = 3 sur 19, soit 16%). La répartition des ressources physiques utilisées par les concepteurs est présentée sur la figure 20.

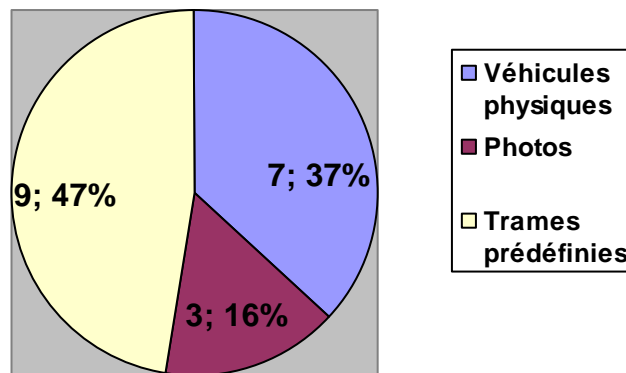


Fig. 20. Ressources physiques, utilisées par les concepteurs : fréquences et pourcentages

Idées d'applications possibles de la RA et suggestions générales

Les formateurs ont exprimé deux idées d'applications possibles de la RA. Ces deux idées sont contenues dans 11 unités thématiques (6% des 188 unités thématiques collectées). Plus de la moitié des unités thématiques (N = 6 sur 11) concernent l'utilisation éventuelle de la RA comme une assistance à la démonstration de pièces du véhicule difficilement visibles par le formateur et les stagiaires. L'autre application envisagée est une aide à la démonstration du fonctionnement des systèmes techniques.

Les concepteurs de formations n'ont envisagé que cette dernière application possible, cependant évoquée très rarement (dans 3 des 175 unités thématiques recueillies). Ils ne voyaient pas l'utilité de la RA en tant qu'aide à leur propre activité.

Les formateurs et les concepteurs de formations ont également exposé plusieurs idées générales, relatives à l'organisation de la conception et de l'animation des formations. Elles concernent la mise à disposition d'un plus grand nombre de véhicules et de pièces didactiques, une meilleure conception des supports pédagogiques et une amélioration de la communication avec les autres services de l'entreprise.

Les suggestions d'ordre général contenues dans les entretiens des concepteurs de formations, concernent toutes la mise à disposition d'une information de meilleure qualité (plus à jour, plus précise, plus complète, etc.).

Notons que quatre des six formateurs interrogés ont exprimé une certaine appréhension de l'introduction d'une technologie éducative, qui pourrait, à leur avis, les « remplacer » dans leur fonction actuelle.

4.2.3. Limites de l'étude

Cette recherche présente la même limite majeure que la recherche utilisant la technique des incidents critiques. Il s'agit ici également d'un recueil indirect des données. Aussi, l'échantillon d'opérateurs interrogés pourrait paraître relativement petit. Notons, cependant, que nous avons interrogé six formateurs sur les huit travaillant au centre de formation au moment de la recherche. Également, six concepteurs sur les huit travaillant au centre de conception de formations ont participé à notre étude. Une autre limite de la recherche réside dans le fait que celle-ci n'a pas été élargie à la conception de véhicules.

4.2.4. Discussion sur l'activité des acteurs de formation dans le contexte des évolutions de la conception de véhicules et applications possibles de la RA

Les résultats de cette seconde étude montrent qu'aujourd'hui, les acteurs de la formation (stagiaires, formateurs, concepteurs de formations) fonctionnent dans un système social et organisationnel de plus en plus complexe et en évolution rapide. Ce contexte dynamique explique une partie des difficultés exprimées par les formateurs et les concepteurs de formations, concernant notamment les incohérences et les retards de livraison des supports de formation, les difficultés de communication, la pression temporelle. L'impression ressentie par les formateurs que leur propre formation autant que les formations qu'ils animent ne soient pas suffisamment approfondies pourrait également être due à l'évolution rapide de la conception et de la maintenance automobile.

Mais c'est également en puisant dans les ressources, fournies par cette structure sociale complexe, que les formateurs et les concepteurs de formations arrivent à résoudre une partie de leurs difficultés quotidiennes. Ainsi, les formateurs évoquent l'utilisation d'informations

fournies par leurs collègues et les stagiaires pour préparer et animer les stages. Nous pouvons supposer qu'il s'agit ici d'informations concernant des pannes apparues sur le terrain ou des aspects spécifiques du fonctionnement de certains systèmes techniques, qui n'ont pas été formalisées dans les documents officiels. Quant aux concepteurs de formations, ils disent utiliser largement leurs propres connaissances et expérience, ressources également informelles, pour concevoir les supports de formation.

La complexité du système de formation dans le domaine de la maintenance automobile aujourd'hui, ainsi que le caractère informel de plusieurs ressources utilisées par les acteurs impliqués nécessite la recherche de nouvelles métaphores explicatives. Une métaphore qui pourrait être un point de départ pour décrire et comprendre le fonctionnement de ce système hautement complexe et évolutif est la métaphore de « communauté de pratiques » (Lave & Wenger, 1991). Une « Communauté de Pratiques » (CdP) est définie comme un réseau social relativement stable, composé d'individus qui, en se fondant sur leurs pratiques communes, partagent et construisent ensemble des connaissances, des croyances, des valeurs et des expériences (Barab, MaKinster, & Scheckler, 2003). Également, les membres d'une CdP, hautement dépendants les uns des autres, partagent des points de vue « minoritaires » (Barab & Duffy, 2000), qui peuvent être différents des perspectives officielles de l'entreprise dans laquelle évolue la communauté.

A notre connaissance, il n'y a pas eu d'études empiriques ou de réflexions sur la formation en maintenance automobile fonctionnant en tant qu'une CdP, mais notre recherche suggère que cette formation présente plusieurs caractéristiques d'une telle communauté. Tout d'abord, une partie des connaissances sur les méthodes de diagnostic et de réparation est construite grâce aux échanges d'informations entre mécaniciens, formateurs, concepteurs de formations et opérateurs travaillant dans le centre d'assistance technique. Ensuite, étant donné que cette information circule constamment entre les différents acteurs impliqués, ils deviennent très dépendants les uns des autres. Ainsi, dans leurs entretiens, les acteurs de la formation en maintenance automobile exposent des difficultés qui sont souvent dues à l'insuffisance des ressources informationnelles des autres membres de la communauté (par exemple, les difficultés provoquées par l'utilisation de versions différentes d'un même véhicule par les différents services). Une partie des résultats de la recherche utilisant la technique des incidents critiques va également dans la même direction. Enfin, la formation en

atelier est principalement assurée par des pairs, ce qui pourrait consolider les liens informels entre les opérateurs et favoriser la construction de « référentiels communs » (de Terssac & Chabaud, 1990 ; Leplat, 1991). Ces référentiels communs sont, en effet, un des piliers d'une CdP.

Pour toutes ces raisons, nous estimons que la formation en maintenance automobile aujourd'hui, au moins telle qu'elle est dispensée dans le réseau après-vente étudié, pourrait être considérée comme une CdP non institutionnalisée, construite à l'initiative des acteurs qui la composent (mécaniciens, formateurs, concepteurs de formations, opérateurs travaillant dans le centre d'assistance technique). Un argument, suggérant que cette communauté serait encore plus large, est l'existence de nombreux forums de discussions sur Internet. Ces forums rassemblent des professionnels de la maintenance, des clients et même des ingénieurs automobiles, intéressés par les sujets des discussions (voir, par exemple, www.planeterenault.com, www.auto-evasion.com/forums/, www.problemauto.com, <http://forum.321auto.com/forum/forum.php>). Plusieurs discussions sur ces forums portent sur des pannes peu connues et, par conséquent, difficilement diagnostiquables en atelier.

Deux principaux types de supports pour une CdP pourraient être proposés, à savoir des supports organisationnels et des supports technologiques. Chandler (2000), par exemple, avance l'hypothèse que, dans des environnements technologiques hautement évolutifs et en même temps communautaires, tels que celui de la maintenance de véhicules, il serait plus efficace de construire des ressources organisationnelles qui « intègrent la formation » que de proposer des systèmes de formation rapide sur le tas.

Une autre hypothèse est l'introduction d'aides technologiques pour faciliter les interactions et le partage de pratiques efficaces dans la communauté. Nous pouvons imaginer une telle aide en RA, malgré le fait qu'aujourd'hui, la technologie présente des limitations importantes et peu de prototypes existants proposent des fonctionnalités typiques pour un collecticiel « traditionnel ». Ainsi, un système de RA pourrait être utile s'il proposait trois fonctions principales :

- Transmettre des données mises à jour, provenant des logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), de la conception de véhicules à la conception et à l'animation de formations.

- Transmettre l'information sur certaines pannes apparues sur le terrain et exposées par les stagiaires des formateurs via les concepteurs de formations aux concepteurs de véhicules.
- Suivre, tracer et avertir des modifications introduites sur les différentes versions des véhicules, utilisées par les différents services de l'entreprise.

Les données CAO, qui constitueraient les éléments virtuels du système, pourraient être superposées sur des parties physiques du véhicule afin de compléter ou de corriger des informations obsolètes, disponibles sur le support physique. En effet, les entretiens avec les acteurs de la formation en maintenance automobile montrent que les véhicules et les pièces didactiques en forme physique sont considérés comme des ressources didactiques importantes et sont largement utilisés à la fois par les formateurs et par les concepteurs de formations.

Etant donné que l'insuffisance de pièces didactiques facilement utilisables est un autre problème évoqué par les formateurs et par les concepteurs de formations, le système de RA pourrait également « augmenter » les pièces physiques par des informations virtuelles (par exemple, en les montrant en coupe et / ou en mouvement, en agrandissant certaines parties importantes, etc.).

4.2.5. Considérations méthodologiques

En tant que méthode d'analyse des besoins, les entretiens avec de futurs utilisateurs d'une technologie fournissent des informations importantes, qui alimentent, à l'intérieur d'un projet de conception, les échanges sur les applications possibles de la technologie à concevoir.

Dans nos deux recherches, les entretiens se sont révélés un moyen rapide et efficace permettant de définir les fonctions principales du futur système de RA, dont les applications possibles étaient peu claires au début du projet. La recherche utilisant la technique des incidents critiques, par exemple, a contribué à orienter les réflexions des acteurs du projet vers une aide au diagnostic des systèmes électroniques, ce qui était une direction différente de celle envisagée initialement. La recherche centrée sur les acteurs de la formation, quant à elle, a suggéré une autre application possible de la RA, à savoir l'aide à la transmission de données mises à jour de la conception de véhicules vers la conception et l'animation de formations, et

vice versa. En ce sens, les entretiens fournissent des informations cruciales pour spécifier des aspects relatifs à l'utilité du futur système.

Les entretiens nous ont permis d'extraire les besoins principaux à la fois à partir des résultats de la première étude, où l'on ne posait pas explicitement des questions concernant les applications possibles de la RA, et à partir des résultats de la deuxième étude, où ce type de questions figurait dans la grille d'entretien. Dans le second cas, les informations obtenues sont plus riches, puisque deux applications additionnelles de la RA ont été proposées par les formateurs et les concepteurs. Cependant, les applications évoquées par les futurs utilisateurs du système ne sont pas nombreuses. Ce constat n'est pas nouveau. Notre revue de la littérature dans le domaine de l'analyse des besoins pour des technologies émergentes montre qu'en règle générale, les utilisateurs évoquent un nombre réduit d'applications possibles d'un dispositif à concevoir (Barrett, Strayer, & Schubart, 2004 ; Bruseberg & McDonagh-Philp, 2001). Cette limitation de la méthode pourrait probablement être dépassée par la présentation, aux futurs utilisateurs, de formes physiques de la technologie émergente à concevoir (par exemple, des films, des maquettes, des prototypes). Une autre hypothèse est la conduite des entretiens dans des cadres sociaux favorisant la créativité (groupes de discussions, séances de brainstorming).

Les entretiens avec des formateurs et des concepteurs de formation ont également révélé des aspects relatifs à l'acceptabilité du futur système de RA. Il y avait, d'une part, une attitude générale très positive à l'égard de l'introduction d'une aide technologique. D'ailleurs, la participation aux recherches a renforcé cette attitude. Mais, d'autre part, quatre des six formateurs interrogés ont exprimé une certaine crainte d'être remplacés par le dispositif. Certainement, le caractère inconnu, inhérent à toute innovation, renforce cette peur.

Un troisième apport de l'utilisation des entretiens en tant que méthode d'analyse des besoins, particulièrement visible au travers des résultats de la recherche centrée sur l'activité de formation, est l'aide à la description du contexte sociotechnique général, dans lequel évoluent les opérateurs interviewés. C'est grâce à cette description que nous avons pu suggérer l'application de la RA comme aide à la communication entre les différents services de l'entreprise. Cette spécificité des entretiens en tant que méthode d'analyse des besoins les rend particulièrement utilisables pour des situations de travail, qui impliquent de nombreux acteurs agissant avec des objectifs variés.

Enfin, les informations obtenues lors des entretiens ont été une aide précieuse à l'interprétation des données des observations, qui sont décrites dans le chapitre suivant.

Néanmoins, les résultats des recherches par entretiens sont assez généraux et ne relatent que les difficultés principales rencontrées par les opérateurs, ainsi que certaines ressources qu'ils mettent en œuvre devant ces difficultés (par exemple, difficultés de diagnostic de l'électronique, difficultés de recréer des pannes d'une manière réaliste, informations obtenues des stagiaires et des collègues, etc.). En ce sens, les données obtenues ne sont pas suffisantes pour construire des scénarios concrets d'utilisation de la future technologie ou pour spécifier les modalités d'interaction. Aussi, l'activité des formateurs et des concepteurs de formations, telle qu'elle se dessine dans leurs entretiens est assez proche de la tâche prescrite. Les formateurs disent, par exemple, utiliser le plus souvent les informations fournies par les concepteurs de formations. Cela pourrait être une description fidèle de la situation de travail, mais cette affirmation pourrait également exprimer une certaine désirabilité sociale (c'est-à-dire une tendance, plus ou moins consciente, à dire ou à faire ce que l'on attend de nous). C'est pourquoi des recherches utilisant des méthodes plus objectives doivent être réalisées afin de compléter les données obtenues à partir des entretiens.

Chapitre 5

L'analyse des besoins par l'observation de l'activité en situation de formation

Introduction

A partir des résultats des études précédentes, de l'analyse bibliographique sur l'ergonomie des systèmes de RA existants et après de nombreuses concertations avec les acteurs du projet (concepteurs, utilisateurs, décideurs), la formation a été choisie comme cadre d'application de la RA. Rappelons qu'une autre application initialement envisagée était un système d'aide au diagnostic, non pas au cours de la formation mais en temps réel, au cours du travail dans les ateliers. Bien que le diagnostic en atelier soit une activité cognitive particulièrement intéressante, l'aide technologique à cette activité n'a pas été choisie comme application possible de la RA, puisque les mécaniciens disposent déjà d'un outil d'assistance d'aide au diagnostic. Celui-ci est développé par des services de Renault, non impliqués dans le projet de recherche concernant l'utilité de la RA en maintenance automobile.

Plusieurs d'autres raisons viennent justifier le choix de la formation comme cadre applicatif de la RA. D'abord, l'aide à la formation est un besoin effectivement exprimé par tous les futurs utilisateurs du système. Ensuite, les applications de formation intéressent le concepteur du prototype (le CEA-LIST). Enfin, les systèmes de RA actuels présentent de nombreux défauts technologiques et leur mise en œuvre dans un environnement aussi contraignant que celui d'un atelier s'avère problématique et encore peu réaliste au stade actuel de la technologie.

C'est pourquoi la suite de la thèse a été explicitement centrée sur l'activité de formation aux nouveaux produits (véhicules et modules fonctionnels). Ainsi, ce chapitre 5 a pour objet de compléter, par des observations réalisées pendant le déroulement de stages de

formation, les données obtenues au moyen d'entretiens, analysés au chapitre 4. Ces observations ont pour objectif de :

- décrire et modéliser l'utilisation des ressources pédagogiques par le formateur et par les stagiaires en situation réelle de formation ;
- proposer ainsi des arguments supplémentaires pour alimenter l'analyse de la communauté de pratiques, construite par les acteurs de la formation ;
- faire des hypothèses sur l'applicabilité et l'utilité de la RA en tant qu'outil didactique ;
- mettre en évidence certains avantages et inconvénients de cette méthode d'analyse des besoins en situation réelle de formation et en amont de la conception de technologies émergentes.

Les résultats de la recherche par observations sont exposés ci-après.

5.1. Méthodologie

Sujets

L'étude a été réalisée avec les 6 formateurs déjà interrogés, âgés de 30 à 53 ans ($M = 40$, $Ety = 11.2$). Ils ont une expérience moyenne de 5 ans en tant que formateurs ($Min = 1$, $Max = 11$) et une expérience moyenne de 14 ans en tant que mécaniciens ($Min = 3$, $Max = 27$). Les observations se sont déroulées après les entretiens.

Pendant les stages portant sur les nouveaux modèles de voitures, un formateur anime un groupe de 8 à 9 stagiaires. Ainsi, pendant l'étude, nous avons observé 52 stagiaires au total. Rappelons qu'en règle générale, les stagiaires sont des COTECH (un seul par garage), puisque ces opérateurs sont chargés de la formation interne en atelier. Cependant, en cas d'impossibilité pour le COTECH de suivre le stage, un autre opérateur, moins qualifié, est envoyé à sa place au centre de formation. Pour cette raison et à cause de leur expérience professionnelle très différente, les stagiaires possèdent des connaissances variables sur le sujet enseigné.

Procédure

Sept sessions de formations ont été enregistrées avec l'accord préalable des formateurs et des stagiaires. Nous ne disposions que d'un seul caméscope. Le caméscope était cadré sur le formateur, puisqu'il jouait un rôle principal et particulièrement actif pendant les sessions de formation. Nous enregistrons ses actions, ainsi que ses interactions avec les formés.

Les observations se sont déroulées en deux étapes. D'abord, 3 sessions portant sur un nouveau produit (le système d'injection « rampe commune »²⁷) ont été enregistrées. Elles étaient animées par deux des formateurs participant à l'étude. Ensuite, 4 autres sessions de formation ont été enregistrées. Elles concernaient un nouveau modèle de véhicule (la Renault MODUS) et étaient animées par les quatre autres formateurs participant à l'étude.

Objectifs et déroulement des stages observés

Les trois sessions portant sur l'Injection Rampe Commune (IRC) ont été réalisées 2 ans après le lancement commercial du produit. L'objectif des stages était l'acquisition de connaissances sur le fonctionnement et le diagnostic de ce système d'injection. La mise en place des stages était motivée par des difficultés de diagnostic de l'IRC, constatées en garage, ainsi que par le renvoi de nombreux systèmes non défectueux aux fournisseurs respectifs. Un manque de méthodes de diagnostic et de réparation de ce type d'injection a également été reconnu par les fournisseurs. La durée du stage était de 12h répartis sur 2 jours. Il s'est déroulé en salle (partie théorique) et en atelier (partie pratique), la répartition du temps d'animation dans les deux endroits étant équivalente.

Les sessions de formation portant sur la Renault MODUS étaient dispensées environ 15 jours avant le lancement commercial du produit. L'objectif du stage était un premier contact physique avec le produit et certains de ses aspects innovants. Il s'agissait aussi bien d'aspects commerciaux que d'aspects relatifs au diagnostic et à la réparation. La durée du stage était de 12h répartis sur 2 jours. Comme le stage décrit plus haut, la formation portant

²⁷ Il s'agit d'un système d'injection qui diffuse le carburant directement dans la chambre de combustion plutôt qu'en amont dans la tubulure d'admission pour les moteurs à allumage commandé, ou dans une préchambre pour les moteurs diesel. Les avantages de l'injection directe consistent en une réduction des émissions polluantes, une réduction de la consommation de carburant et une augmentation des performances (Wikipedia, 2006, http://fr.wikipedia.org/wiki/Injection_directe).

sur la Renault MODUS s'est déroulée en salle (pendant un tiers du temps) et en atelier (pendant deux tiers du temps).

Les deux types de formation étaient organisés dans les mêmes locaux. La configuration physique des salles est la suivante : pièces rectangulaires, postes des stagiaires dos aux murs autour de la salle, poste du formateur en face des stagiaires et devant le tableau (fig. 21).



Fig. 21. Formation en salle

L'atelier est un local large, de forme rectangulaire. Tout formateur possède un ou deux postes de travail, constitués d'un véhicule didactique chacun. Les stagiaires travaillent soit sur un seul véhicule, soit sur deux véhicules par groupe de 4 à 5 personnes (fig. 22).



Fig. 22. Formation en atelier

Analyse des données obtenues et schémas de codage

Les enregistrements vidéo ont une durée totale de 52h²⁸ (12h15 pour le stage « IRC » et 39h45 pour le stage « Renault MODUS »). Trois schémas de codage successifs ont été appliqués à différentes parties du corpus des données vidéo. Un premier codage, qui avait pour but de servir d'un cadre d'analyse initial des données recueillies, était testé sur les enregistrements du stage « IRC ». Ensuite, développé et enrichi, ce même codage a été appliqué aux enregistrements du stage « Renault MODUS ». Enfin, un troisième codage, dont l'objectif principal était d'affiner certains aspects intéressants de l'analyse, a été appliqué aux données relatives au stage « Renault MODUS ».

Premier codage

Comme pour les entretiens, notre premier schéma de codage est centré sur l'utilisation des ressources pédagogiques, physiques et interactionnelles, par le formateur. La technique de catégorisation adoptée se fonde en partie sur un modèle visant l'analyse et la description du processus dynamique d'acquisition de savoirs de la part de l'apprenant dans des contextes réels de formation, proposé par Barab, Hay, & Yamagata-Lynch (2001). Dans notre cas, ce modèle a été adapté afin de décrire l'activité du formateur.

La technique d'origine repose sur la segmentation du corpus des données brutes en « épisodes pertinents pour l'activité d'apprentissage ». Chaque épisode se présente comme une description « minimale » des acteurs concernés, de leurs actions, ainsi que des objets, des ressources et des outils qu'ils utilisent. Les épisodes sont délimités par un changement du thème traité, de l'activité principale réalisée, de l'acteur ou de la ressource utilisée (pour plus de détails sur la technique, voir Barab *et al.*, op. cit.). Dans notre étude, l'unité d'analyse est l'épisode d'utilisation de ressources, défini comme une séquence d'actions. Tout épisode est délimité par le changement de ressources. Le choix de cette unité d'analyse est guidé et motivé par notre question de recherche concernant la description et la modélisation de l'utilisation des ressources pédagogiques par le formateur.

²⁸ Le temps total d'enregistrement est inférieur à la somme des durées des deux stages, puisque les formateurs et les stagiaires n'ont pas été filmés pendant les pauses, par exemple. Les « temps morts » de la formation (ex. : les déplacements salle - atelier) n'ont pas été filmés non plus.

Notre premier codage s'est également inspiré d'une typologie des interactions verbales spontanées entre enseignant et élèves, présentée par Flanders (1970). Ce système typologique, particulièrement utilisé pour des observations dans un cadre éducatif, consiste en 10 catégories d'interactions, dont 7 relatives aux interventions de l'enseignant et 3 relatives aux interventions de l'élève. Les interventions de l'enseignant sont schématisées de la manière suivante : accepter un sentiment ; récompenser ou encourager un effort, une réponse ; accepter ou utiliser une idée de l'élève ; poser des questions ; exposer un contenu pédagogique ; donner des orientations ou des ordres ; critiquer. Les interventions de l'élève, telles qu'elles sont résumées par Flanders (op. cit.), sont les suivantes : répondre ; exprimer une idée ; marquer un silence / exprimer une certaine confusion²⁹. Nous avons adapté cette typologie afin de décrire les objectifs d'utilisation des ressources pédagogiques par le formateur et certaines ressources interactionnelles des opérateurs.

Ainsi, dans notre premier codage, à chaque épisode, défini comme décrit plus haut, sont associées les caractéristiques suivantes :

- **Durée de l'épisode** (en s).
- **Thème traité** : briefing / débriefing ; présentation du fonctionnement général du produit ; présentation des méthodes de diagnostic de pannes ; simulation de résolution de pannes.
- **Ressources physiques, utilisées par les formateurs et par les stagiaires** : *véhicules et pièces didactiques* (avec ou sans outils de diagnostic et de mesure) ; *documents techniques, fournis par les concepteurs de formations* (il s'agit de manuels de formation et de présentations Power Point) ; *annotations* (informations supplémentaires en forme de texte, de schémas ou de dessins, ajoutées sur le tableau).
- **Ressources interactionnelles, utilisées par les formateurs** : *information* (le formateur annonce un fait, donne un renseignement, ex. : « On va commencer par

²⁹ La typologie est exposée d'une manière plus détaillée dans Flanders (1970). Des exemples d'application et d'adaptation sont présentés dans Wragg (1999).

l'arrière » (du véhicule) ou « Ici, j'ai une ouverture de secours ») ; *question* (le formateur formule une interrogation, ex. : « T'avais même pas une reprog à faire ? Rien ? » ou « D'accord ? C'est clair pour ça ? ») ; *explication* (le formateur donne des éclaircissements sur un processus, des actions, une procédure, etc., ex. : « Ce qu'il faut faire : vous allez par là...Votre main, il faut que vous la mettiez au maximum...Moi, j'arrive à l'avoir aux bouts des doigts » ou « C'est une information, c'est une gestion calculateur. Pour un client, il ne faut pas aller plus loin ») ; *actions* (le formateur manipule le véhicule ou les pièces didactiques, avec ou sans outil de diagnostic) ; *jugement* (ex. : « Ça reste quand même assez simple », « Par contre, le vissage, c'est quand même assez lourd » ou « La méthode, c'est un proto ») ; acquiescement (le formateur exprime son accord avec une idée proposée par des stagiaires, ex. : « D'accord », « Impeccable »).

- **Ressources interactionnelles utilisées par les stagiaires :** *information S*³⁰ (les stagiaires donnent des renseignements aux formateurs, ex. : « Au début, on ne savait pas comment faire, donc on demandait à la Techline³¹ comment mesurer le débit, mais pas de consigne sur la longueur des tuyaux...Combien je devais en avoir dans chaque tuyau ») ; *actions S* (les stagiaires manipulent le véhicule ou les pièces didactiques) ; *question S* (les stagiaires demandent des renseignements, ex. : « Pourquoi ont-ils mis une diode ? Pourquoi n'ont-ils pas mis un fusible ? ») ; *jugement S* (ex. : « Là, les petites roues, c'est pas mal »).
- **Objectifs d'utilisation des ressources physiques :** illustrer son discours ; faire une démonstration ; noter une information supplémentaire ; illustrer le fonctionnement du véhicule ; résoudre une panne simulée.
- **Objectifs d'utilisation des ressources interactionnelles :** présenter le fonctionnement du véhicule ; acquérir des connaissances sur une panne apparue sur le terrain ; décrire une expérience terrain ; encourager stagiaires ; présenter des

³⁰ S pour Stagiaire(s).

³¹ Il s'agit de la ligne d'assistance technique.

méthodes de diagnostic ; suggérer une résolution de panne ; évaluer connaissances stagiaires ; résoudre panne.

Après avoir appliqué le codage présenté ci-dessus aux données vidéo du stage « IRC », nous avons mis en évidence une de ses limites majeures, à savoir le manque de différenciation entre les objectifs des formateurs et les objectifs des stagiaires. C'est pourquoi un deuxième codage a été développé.

Deuxième codage

Les catégories, telles qu'elles apparaissent dans le deuxième codage, sont les suivantes :

- **Durée de l'épisode** (en s) : identique au premier codage.
- **Thème traité** : *briefing / débriefing ; présentation générale du produit* (il s'agit aussi bien d'aspects commerciaux tels que la présence de porte-vélo, de banquette arrière modulable, etc. que d'aspects plus techniques tels que le démontage du filtre habitacle ou de la casquette du tableau de bord) ; *présentation de l'architecture électrique et électronique du véhicule* (il s'agit d'une présentation de la distribution des alimentations, du fonctionnement de systèmes tels que l'essuyage, l'éclairage, etc.) ; *présentation des méthodes de diagnostic* (il s'agit aussi bien de la présentation orale de ces méthodes que de la simulation de résolution de pannes).

Les modifications dans cette catégorie sont attribuables au contenu enseigné pendant le stage « Renault MODUS ». Ainsi, il y avait une partie importante du stage qui concernait le fonctionnement et l'architecture des systèmes électriques et électroniques. Par conséquent, les aspects relatifs à la réparation étaient traités rapidement, pendant la présentation générale du produit. Également, la simulation de résolution de pannes sur des véhicules didactiques occupait une place moins importante. Souvent, les pannes et leurs solutions étaient décrites oralement. Dans ce sens, il s'agissait plus d'une présentation de certaines méthodes de diagnostic que d'un vrai processus de recherche de pannes.

- **Ressources physiques, utilisées par les formateurs** : identique au premier codage.
- **Ressources interactionnelles, utilisées par les formateurs** : identique au premier codage. Une sous-catégorie supplémentaire, à savoir *Hypothèse*, a été ajoutée. Dans ce cas, le formateur avance des suppositions sur l'origine d'un phénomène ou d'une caractéristique du véhicule (ex. : "On va dire qu'il y a eu un oubli dans la programmation du CD...peut-être" ou « Le mec à l'usine, il a dû l'oublier »).
- **Ressources physiques, utilisées par les stagiaires** : identique au premier codage, mais l'utilisation d'annotations par les stagiaires n'a pas pu être observée. C'est pourquoi cet indice n'a pas été relevé pour les stagiaires.
- **Ressources interactionnelles, utilisées par les stagiaires** : identique au premier codage, mais les trois sous-catégories suivantes ont été ajoutées : Prise de notes S, Hypothèse S, Paraphrase S.
- **Objectifs d'utilisation des ressources physiques par les formateurs** : identique au premier codage, sauf pour la sous-catégorie « *illustrer le fonctionnement du véhicule* », qui a été enlevée. Cet objectif du formateur a été, en effet, intégré dans les objectifs « *faire une démonstration* » et « *illustrer son discours* ». Cette suppression est motivée par le fait que l'objectif « *illustrer le fonctionnement du véhicule* » est compris, en grande partie, dans le thème « *présentation de l'architecture électrique et électronique du véhicule* ».
- **Objectifs d'utilisation des ressources interactionnelles par les formateurs** : identique au premier codage, sauf pour la sous-catégorie « *résoudre panne* » qui a été enlevée, puisque peu de résolutions de pannes effectives ont été observées. Au contraire, le formateur passait beaucoup de temps à décrire les caractéristiques générales du véhicule (par exemple, les options proposées). C'est pourquoi une sous-catégorie « *présenter les caractéristiques générales du véhicule* » a été ajoutée.

- **Objectifs d'utilisation des ressources physiques par les stagiaires** : explorer le véhicule ; effectuer opérations de montage / démontage ; illustrer son discours ; noter informations supplémentaires.
- **Objectifs d'utilisation des ressources interactionnelles par les stagiaires** : acquérir connaissances ; évaluer les choix de conception ; noter informations supplémentaires ; suggérer solution de panne ; décrire expérience terrain.

Enfin, un troisième codage, dont l'objectif principal était d'affiner l'analyse des interactions verbales entre les formateurs et les stagiaires, a été appliqué aux données vidéo du stage « Renault MODUS ».

Troisième codage

Il s'agit ici d'une analyse thématique du contenu des échanges verbaux formateurs – stagiaires. L'unité d'analyse utilisée est le monologue ou le dialogue portant sur un même thème. La majorité des monologues analysés ont été énoncés par le formateur, ce qui est une conséquence logique de la focalisation de la caméra principalement sur l'activité de cet opérateur. Dans tous les cas, les dialogues analysés sont des échanges entre le formateur et un stagiaire.

Les thèmes principaux qui émergent dans les monologues et les dialogues étudiés concernent :

- **Le partage de certaines connaissances techniques**, notamment de *procédures de réparation connues* à la fois par les formateurs et par les stagiaires (ex. : « Pour l'ordre de serrage, vous utilisez le manuel de réparation, comme vous avez l'habitude ») ; de *procédures de diagnostic connues* (ex. : « C'était Laguna ou Scénic ? la reconfiguration de la super condamnation...Il ne fallait pas reconfigurer. C'est pareil ici ») ; de *technologies connues* (ex. : feux à diodes) ; de *anciens modèles* de véhicules *similaires* au nouveau modèle ; de *procédures de réparation ad hoc*, que les mécaniciens utilisent sur le terrain et qui s'écartent plus ou moins des procédures prescrites (ex. : « Voici le filtre habitacle. On l'a sans démonter la boîte à gants. Moi, j'ai essayé. On peut l'avoir »).

- **Les désaccords du formateur avec des avis exprimés par les stagiaires.**
- **Les évaluations des choix de conception, exprimées par le formateur et les stagiaires.** Ces évaluations peuvent être soit positives, soit négatives.

Analyses statistiques

Ensuite, nous avons réalisé des analyses statistiques bi- et multi-variées sur les protocoles ainsi codés.

Validation des schémas de codage

La réalisation d'auto confrontations n'a pas été possible à cause de la charge de travail des formateurs et de la longueur des enregistrements vidéo. Cependant, les données brutes ont été mises à disposition des opérateurs qui ont visionné des parties des films. En outre, les schémas de codage, exposés plus haut, ont été validés lors de 2 réunions avec les formateurs.

5.2. Résultats

Comme pour les entretiens, nous ne présentons ici que les résultats qui apportent des éléments permettant de répondre aux questions de recherche posées. Des résultats plus détaillés sont présentés dans Anastassova (2005a) et Anastassova, Burkhardt, Mégard, & Leservot (2005).

Pendant les stages, peu de difficultés ont été directement observées. De plus, ces difficultés n'avaient pas une importance majeure pour l'efficacité des interactions didactiques (par exemple, des pannes, peu fréquentes, du logiciel de diagnostic). C'est pourquoi, les difficultés pendant les sessions de formation ont surtout été déduites de certains comportements observables des formateurs. Ainsi, nous pouvons inférer que les thèmes traités longuement concernent des aspects particulièrement importants ou difficiles de la tâche à apprendre. Nous exposons ci-dessous les conclusions sur ce point en distinguant les deux types de formation observés.

Stage « IRC »

Au total, nous avons analysé 865 épisodes. La durée minimale d'un épisode est une seconde. La durée maximale est 8min 45s (M = 37s, Ety = 60s).

La présentation des méthodes de diagnostic et la simulation de résolution de pannes sont des aspects importants du stage

D'après le critère de durée, les thèmes jugés particulièrement importants ou difficiles par les formateurs sont les suivants : présentation des méthodes de diagnostic de l'injection (traité pendant 4h50, soit 40% de la durée totale des enregistrements) et la simulation de résolution de pannes (traité pendant 4h10, soit 35% de la durée totale des enregistrements). Des thèmes occupant une moindre place sont la présentation du fonctionnement général du système technique (1h55, soit 16%) et, logiquement, le briefing et le débriefing (55min, soit 8%).

Les ressources interactionnelles les plus utilisées sont l'explication et l'information sur des pannes apparues sur le terrain

Les formateurs fondent leur discours principalement sur des explications (5h50, c'est-à-dire 47 % du temps d'utilisation de ressources interactionnelles). Les autres ressources interactionnelles sont utilisées moins souvent : l'information - pendant 10% du temps (ou 1h13) ; les manipulations de véhicules ou pièces didactiques – pendant 5% du temps (34 min) ; l'ensemble des autres ressources interactionnelles (jugements, questions, acquiescements) – pendant 9% du temps (65min). Il est intéressant de noter que les informations sur des expériences de terrain, fournies par des stagiaires, occupent une place relativement importante en tant que ressource interactionnelle. Ces informations sont utilisées pendant 1h16 (12% du temps d'utilisation de ressources interactionnelles). Une autre occupation importante des stagiaires est la manipulation des véhicules ou pièces didactiques (1h12, soit 11%). Les stagiaires posent des questions (22min, soit 3%) ou expriment des jugements assez rarement (19min, soit 2%).

Les ressources physiques les plus utilisées sont les véhicules didactiques et les annotations

Les ressources physiques sont principalement utilisées par les formateurs. Ces opérateurs utilisent le plus souvent des véhicules et des pièces didactiques (pendant 3h25, soit 35% du temps d'utilisation de ressources physiques). Les annotations (3h15, soit 34%) et les supports pédagogiques, fournis par les concepteurs de formations (2h58, soit 31%), sont utilisés moins souvent.

Pour affiner ces conclusions, nous avons calculé des Taux de Liaison (TDL) entre les objectifs que les formateurs se fixent et les sujets discutés pendant la formation. Nous avons également réalisé une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC).

Quelles ressources pour quels objectifs

Les TDL calculés montrent que l'information (TDL = 1.44) et les explications (TD = 0.70) sont principalement utilisées par les formateurs pour présenter les méthodes de diagnostic (voir Annexe 11, tabl. 1 pour la répartition des effectifs et tabl. 2 pour l'ensemble des TDL). Les explications sont également utilisées afin de décrire le fonctionnement général de l'IRC (TDL = 1.39). Les questions servent, d'une part, à obtenir des informations relatives à diverses pannes apparues sur le terrain (TDL = 2.68) et, d'autre part, à évaluer la compréhension et les connaissances des formés (TDL = 3.46). Les connaissances des stagiaires sont également évaluées par des jugements (TDL = 5.76). Les acquiescements des formateurs sont essentiellement utilisés afin d'encourager les stagiaires (TDL = 22.38).

Il est intéressant de noter que les questions des stagiaires portent moins sur le contenu enseigné que sur des pannes apparues sur le terrain (TDL = 14.24). Ces pannes peuvent être exposées soit par d'autres stagiaires, soit par les formateurs qui retransmettent ainsi des informations fournies par des formés des stages précédents. Ainsi, les informations que les stagiaires exposent concernent principalement leur expérience du terrain (TDL = 1.75) et des suggestions de résolutions possibles d'une panne particulière (TDL = 2.42). Notons que même les jugements des stagiaires portent majoritairement sur des pannes apparues sur le terrain (TDL = 3.91).

Et, comme il est logique, les formateurs et les stagiaires manipulent, afin de résoudre des pannes simulées, les pièces et les véhicules didactiques (TDL = 20.10 et TDL = 19.22, respectivement). Toutes ces liaisons entre les variables sont fortes ($V^2 = 0.46$). La fig. 23 est une représentation graphique de ces attractions.

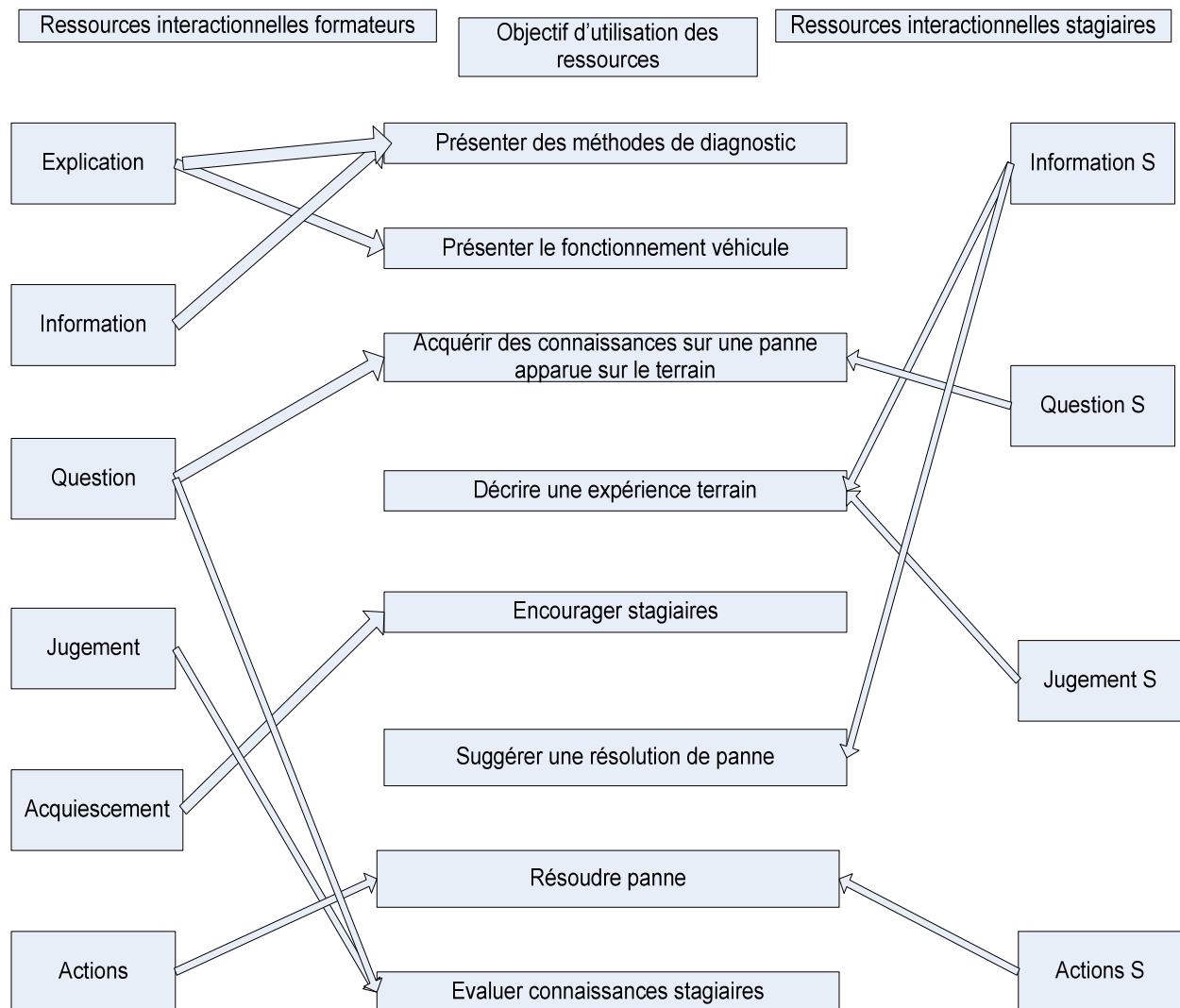


Fig. 23. Représentation graphique des attractions entre les ressources interactionnelles utilisées et les objectifs de leur utilisation

Les relations entre les ressources physiques utilisées et les objectifs de leur utilisation ont été étudiées et schématisées au moyen d'une AFC. Pour cette analyse, nous avons construit un tableau de contingence, établi à partir de 2 variables catégorisées : la variable « Ressources physiques » à 3 modalités (Véhicules et pièces didactiques, Annotations et

Documents pédagogiques) et la variable « Objectif d'utilisation » à 5 modalités (illustrer son discours ; faire une démonstration ; noter une information supplémentaire ; illustrer le fonctionnement du véhicule ; résoudre une panne simulée). Les données numériques utilisées pour l'interprétation de l'AFC sont présentées dans l'Annexe 12 (tabl. 1 et tabl. 2).

Conformément à la technique d'analyse des données multidimensionnelles, nous avons retenus 2 axes factoriels résumant la totalité de la variance. La fig. 24 est une représentation graphique des correspondances qui existent entre les variables dans l'espace euclidien.

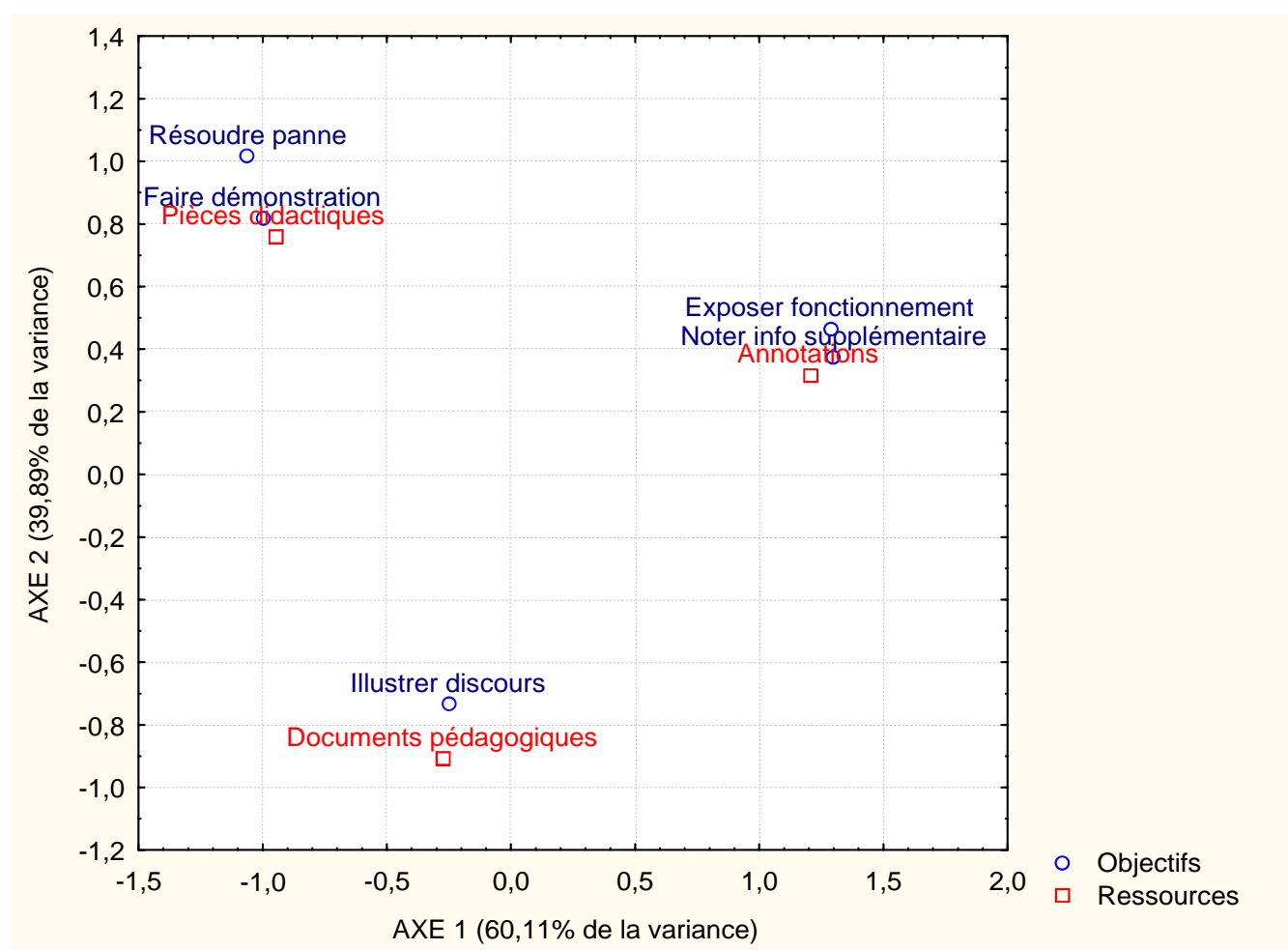


Fig. 24. Nuage des points : ressources physiques et objectifs de leur utilisation

L'axe 1 représente une opposition entre les ressources physiques, fournies par les concepteurs de formations, notamment les pièces didactiques et les supports pédagogiques, et les ressources propres des formateurs (les annotations, en l'occurrence). Cet axe montre également que les ressources physiques « prescrites » servent principalement à la

démonstration et à l'illustration du discours du formateur. Les annotations que les formateurs ajoutent eux-mêmes sont majoritairement utilisées pour donner des informations supplémentaires et pour aider la présentation du fonctionnement du véhicule. Cet axe exprime ainsi une opposition entre ce qui est disponible mais probablement insuffisant et ce qui est indisponible mais nécessaire et, par conséquent, est ajouté par les formateurs eux-mêmes.

L'axe 2 représente une opposition entre, d'une part, les supports pédagogiques et les objectifs de leur utilisation et, d'autre part, tous les autres ressources physiques et les objectifs de leur utilisation. Cette opposition pourrait être interprétée comme un contraste entre les ressources physiques utilisées dans un seul but et celles qui servent simultanément plusieurs objectifs. Ainsi, les documents pédagogiques sont uniquement utilisés pour illustrer le discours du formateur, tandis que les annotations sont utilisées à la fois pour donner des informations supplémentaires et pour aider la présentation du fonctionnement du véhicule. Également, les pièces et les véhicules didactiques servent à la fois comme supports de démonstration et de résolution de panne. Une généralisation possible de ce résultat pourrait être une opposition entre ce qui est utile dans plusieurs contextes (c'est-à-dire polyfonctionnel) et ce qui est utile uniquement pour une tâche particulière (c'est-à-dire monofonctionnel).

Stage « Renault MODUS »

Au total, nous avons analysé 4414 épisodes avec une durée minimale d'une seconde et une durée maximale de 7 min 54 s (M=23, SD=32).

Plusieurs tendances concernant l'activité de formation, observées pendant le déroulement du stage « IRC », ont également été relevées pendant le stage « Renault MODUS ». Par un souci de concision, quand il s'agit de résultats déjà observés, nous n'exposons que les principales conclusions.

Confirmation des tendances observées pendant le stage « IRC »

Encore une fois, les explications et les informations sont les ressources interactionnelles les plus souvent utilisées par le formateur. Les explications sont utilisées pendant 15h (soit 38% de la durée du stage « Renault MODUS ») et les informations sont

utilisées pendant 10h20min (soit 26% de la durée du stage). Comme pendant le stage « IRC », les autres ressources interactionnelles sont utilisées moins souvent : les manipulations de véhicules et pièces didactiques – pendant 21% du temps (soit 8h48min) et l'ensemble des autres ressources interactionnelles – pendant 15% du temps (soit 6h). Également, les ressources physiques utilisées le plus souvent sont les véhicules et les pièces didactiques en forme physiques (utilisées pendant 77% du temps d'utilisation de ressources physiques). A la différence du stage « IRC », pendant le stage « Renault MODUS » les annotations sont utilisées moins souvent (pendant 6% du temps d'utilisation des ressources physiques) que les supports pédagogiques fournis par les concepteurs de formations (pendant 17% du temps).

Comme pendant le stage « IRC », les véhicules et les pièces didactiques servent principalement à faire des démonstrations ($TDL = 0.20$) et à résoudre des pannes simulées ($TDL = 0.31$). Les supports pédagogiques fournis par les concepteurs de formations servent à illustrer le discours du formateur ($TDL = 1.74$), tandis que les annotations sont utilisées afin de donner des informations supplémentaires ($TDL = 13$). Toutes ces liaisons sont fortes ($V^2 = 0.65$). Le tableau des effectifs, ainsi que celui de l'ensemble des TDL sont présentés dans l'Annexe 13.

Thèmes dominants

Trois thèmes dominants (c'est-à-dire discutés longuement) se dégagent. Ce sont la présentation de l'architecture électrique et électronique du véhicule (discuté pendant 14h, soit 35% de la durée des stages), la présentation des méthodes de diagnostic (discuté pendant 13h15h, soit 33% de la durée des stages) et la présentation des caractéristiques générales du produit (discuté pendant 12h, soit 30% de la durée des stages). Le briefing / débriefing n'occupe que 2% de la durée des stages (soit 50min).

Les formateurs formulent des questions et des hypothèses principalement pendant la présentation de l'architecture électrique et électronique du véhicule

D'une manière générale, les formateurs formulent peu d'hypothèses, qui apparaissent uniquement dans 65 des 4414 épisodes analysés (ce qui représente moins de 2%).

Bien que la liaison ne soit pas forte globalement ($V^2 = 0.02$), les TDL montrent que, dans la majorité des épisodes, les formateurs formulent des hypothèses (TDL = 0.13) et posent des questions (TDL = 0.29), quand ils présentent l'architecture électrique et électronique du véhicule (voir Annexe 14 pour les tableaux des effectifs et de l'ensemble des TDL).

La ressource interactionnelle la plus souvent utilisée afin de présenter les méthodes de diagnostic est l'explication (TDL = 0.22). L'information est principalement donnée pendant les séances de briefing et débriefing (TDL = 0.91). En général, pendant le stage « Renault MODUS », les formateurs travaillent sur les véhicules didactiques quand ils présentent leurs caractéristiques techniques générales (TDL = 0.45).

Les stagiaires formulent également des hypothèses pendant la présentation de l'architecture électrique et électronique du véhicule

Nos résultats montrent que les stagiaires formulent également des hypothèses quand le formateur présente le fonctionnement de l'électrique et de l'électronique (TDL = 0.34, voir Annexe 15 pour les tableaux des effectifs et de l'ensemble des TDL). Pendant les discussions sur ce sujet, les stagiaires donnent également des informations sur des pannes apparues sur le terrain (TDL = 0.26) et font des paraphrases du contenu exposé par le formateur (TDL = 0.49). Les séances de briefing et débriefing sont un autre moment privilégié pour rendre compte de sa propre expérience du terrain et acquérir des connaissances à partir de celle des autres (TDL = 0.94). Dans la majorité des cas, les stagiaires prennent des notes quand le formateur présente les méthodes de diagnostic et de résolution de pannes (TDL = 1.15). Les jugements des formés portent principalement sur les caractéristiques générale, commerciales et techniques, du véhicule (TDL = 1.77). La force de ces liaisons est intermédiaire ($V^2 = 0.9$).

Les formateurs utilisent des annotations afin de présenter l'architecture et le fonctionnement de l'électricité et l'électronique

Pour faciliter la présentation de l'architecture électrique et électronique et de son fonctionnement, les formateurs se servent des annotations (TDL = 1.09) et des documents pédagogiques, fournis par les concepteurs de formations (TDL = 0.73, voir Annexe 15 pour les tableaux des effectifs et de l'ensemble des TDL). Les supports pédagogiques sont

également utilisés pendant les séances de briefing et débriefing (TDL = 3.22). La force de ces liaisons est intermédiaire ($V2 = 0.13$).

Une formation centrée sur l'utilisation d'analogies et d'exemples

Les analyses des dialogues entre le formateur et les stagiaires montrent que, dans la majorité des cas, ces échanges concernent des comparaisons à des modèles connues. Celles-ci émergent dans 43% des échanges thématiques formateur – stagiaires (N = 148 sur 347, voir tabl. 7). Viennent ensuite des dialogues dont le thème principal fait référence à des technologies connues (dans 25% des échanges thématiques formateur – stagiaires, N = 86 sur 347).

Connaissances techniques partagées						
Compar. modèles connus	Compar. technos connus	Echange procéd. pépar. connues	Echange procéd. <i>ad hoc</i>	Echange procéd. diag. connues	Désaccord / critiques formateur	Total
148 (43 %)	86 (25 %)	44 (13 %)	42 (11%)	18 (5%)	9 (3 %)	347 (100%)

Tabl. 7. Principaux thèmes des dialogues formateur - stagiaires (répartition : effectifs et pourcentages)

Le formateur et les stagiaires échangent des procédures de réparation connues, ainsi que des procédures utilisées sur le terrain relativement moins souvent (dans 13% et 11% des cas, respectivement). Les procédures de diagnostic connues sont échangées assez rarement (elles occupent une place centrale dans 5% des unités thématiques constituées à partir des dialogues formateur – formés). Également, le formateur critique assez rarement les stagiaires (dans 3% des thématiques).

5.3. Limites de l'étude

L'étude de l'activité de formation au moyen d'observation présente les limites suivantes : l'échantillon de formateurs et de stages observés est relativement réduit ; la réalisation d'auto confrontations n'a pas été possible ; les données recueillies sont abondantes et les deux premiers schémas de codage adoptés visent une description assez détaillé de l'activité de formation, ce qui complique la communication des résultats en une forme facilement utilisable par les concepteurs.

5.4. Discussion sur l'activité de formation dans le contexte des évolutions de la conception de véhicules et applications possibles de la RA

Les résultats de l'étude au moyen d'observations dans des situations réelles de formation complètent les données obtenues grâce aux entretiens. Ce constat est valable aussi bien pour le fonctionnement du système de formation en maintenance automobile en tant qu'une Communauté de Pratiques (CdP) que pour les idées d'applications possibles de la RA.

Les difficultés des formateurs, observées pendant les stages, semblent principalement liées à la présentation des méthodes de diagnostic et à la présentation du fonctionnement des systèmes techniques, notamment de l'architecture électrique et électronique du véhicule. Tout d'abord, ce sont des aspects discutés longuement. Egalement, c'est pendant les discussions sur ces sujets que les formateurs énoncent diverses hypothèses sur des points peu maîtrisés du contenu pédagogique et ajoutent des annotations (des ressources non prescrites dont l'utilisation n'était même pas évoquée dans les entretiens) pour compléter leur discours et l'information disponible sur les supports fournis par les concepteurs de formations.

La présentation des méthodes de diagnostic et la présentation du fonctionnement des systèmes techniques se révèlent également des points problématiques pour la compréhension de la part des stagiaires. Ainsi, leurs questions et leurs hypothèses concernent ces mêmes sujets. La présentation des méthodes de montage et de démontage semble moins difficile à exposer et à comprendre, ou moins importante, et pour les formateurs, et pour les stagiaires. Nous retrouvons ainsi les mêmes préoccupations que celles exposées par les mécaniciens dans les entretiens, fondés sur la technique des incidents critiques. Ces résultats pourraient être des arguments supplémentaires (et plus objectifs) en faveur de l'hypothèse qu'aujourd'hui, la

formation en maintenance automobile fonctionne comme une CdP, construite sur la base de difficultés et d'expériences communes.

Un autre argument dans ce sens est le résultat montrant que les informations sur des pannes apparues sur le terrain sont une des ressources interactionnelles, utilisées très souvent par les deux groupes de protagonistes (formateurs et stagiaires). Cette observation, ajoutée à l'utilisation d'hypothèses, bien que peu nombreuses, et aux critiques rares de la part du formateur, remet en question son rôle traditionnel d'« incarnation » du savoir. Nous pouvons émettre l'hypothèse que, dans le réseau après-vente étudié et dans le contexte actuel de la maintenance automobile, les formateurs ont aussi un rôle de facilitateurs des échanges dans le groupe de formation, ainsi qu'un rôle de transmission de données intéressantes du terrain vers la conception de formations. Des arguments plus « subjectifs », soutenant cette supposition, peuvent être trouvés dans les entretiens, qui relatent l'impression des formateurs que les formations qu'ils animent ne sont pas suffisamment approfondies, notamment en ce qui concerne le fonctionnement de l'électronique. Une telle position du formateur pourrait avoir au moins deux types d'effets sur le fonctionnement de la CdP construite à partir de pratiques communes en maintenance automobile. Grâce à la situation relativement égalitaire et symétrique qui en résulte, elle pourrait contribuer à consolider les liens entre les différents acteurs impliqués (plus particulièrement, entre les formateurs et les stagiaires). Cependant, la fragilisation des savoirs, suggérée par ce nouveau rôle du formateur, pose des questions quant à la fiabilité et à l'efficacité du système sociotechnique à long terme.

Un autre résultat, qui nous incite à définir la formation en maintenance automobile aujourd'hui comme une CdP, est le partage de diverses connaissances techniques et le nombre important d'analogies, utilisées pour exposer le contenu pédagogique pendant les stages. Notons qu'il s'agit ici principalement de comparaisons à des modèles de véhicules et à des technologies déjà existants, ainsi que de procédures de réparation déjà connues ou utilisées sur le terrain et non spécifiées dans les documents officiels. Des procédures de diagnostic déjà connues ou établies *ad hoc* sont échangées moins souvent. Une interprétation possible de ce résultat pourrait être une certaine prudence des formateurs et des stagiaires à énoncer et à communiquer des informations éventuellement peu fiables sur des méthodes de diagnostic, qu'ils ne maîtrisent pas toujours complètement.

Les observations en situation réelle de formation ont confirmé les résultats des entretiens qui montraient que les véhicules didactiques et la documentation technique disponible sont des ressources cruciales pour le bon déroulement des stages. Dans ce sens, on voit ici un avantage concret de l'utilisation de la RA (par rapport à la RV ou à des films, par exemple) qui est la possibilité d'offrir un double support à la fois réel et virtuel aux apprenants et aux formateurs.

En se fondant sur la discussion exposée plus haut, ainsi que sur les conclusions des études précédentes, nous pouvons avancer l'idée d'un prototype de RA qui aiderait la présentation du fonctionnement de l'électricité et de l'électronique, ainsi que la simulation de pannes sur ces systèmes. La partie réelle du dispositif pourrait être constituée par un véhicule réel non démonté, tandis que sa partie virtuelle pourrait être constituée d'annotations visuelles indiquant les pièces véhicule invisibles, importantes pour la conduite de l'interaction didactique (par exemple, la topologie des calculateurs, la transmission de l'information, etc.). Il est probable qu'un tel système favorise les échanges entre le formateur et les stagiaires et, par ce biais, l'explication de concepts et la compréhension des formés. Au cas où le système permettrait la prise de notes sur les difficultés des stagiaires et les cas de pannes exposés, il pourrait s'avérer utile comme système de suivi des formés et de transmission de l'information de ce suivi vers la conception de véhicules et la conception de formations.

5.5. Considérations méthodologiques et perspectives

Les observations en situation réelle de formation nous ont permis de construire une image plus systématique et plus objective de la situation de travail étudiée, que celle déjà construite à partir des données des entretiens. Nous avons obtenu des informations concrètes sur la mise en œuvre des ressources pédagogiques par les formateurs et les stagiaires. Des données plus précises sur les objectifs d'utilisation des ressources ont également été obtenues. Ces données représentent une base alimentant la construction de scénarios concrets d'utilisation du futur système de RA. Dans une perspective plus large, elles peuvent également servir à la création de tâches à réaliser par des utilisateurs lors de tests d'évaluation d'un futur dispositif.

Notons que peu de difficultés ont été directement observées lors de la conduite réelle des interactions didactiques. Ce résultat est inféré à partir des comportements observables des

deux groupes d'acteurs (formateurs et stagiaires) et pourrait être considéré comme une caractéristique inhérente de la situation de travail analysée. Une explication possible du nombre limité de difficultés lors des stages serait que l'activité d'animation de formations est le résultat d'une préparation systématique de la part du formateur, qui lui permettrait d'anticiper une grande partie de ses propres difficultés et de celles des stagiaires. Une autre explication possible réside dans le fait que les observations se sont déroulées environ deux semaines après le début des formations. Les formateurs avaient donc déjà travaillé avec plusieurs groupes de stagiaires et étaient conscients des points problématiques des stages animés. C'est pourquoi nous avons inféré l'importance du sujet enseigné à partir du temps accordé à sa discussion. Cette information nous a permis de cibler les thèmes de la formation, pendant lesquels un système de RA pourrait être utile. Il s'agit de la présentation des méthodes de diagnostic et de l'architecture électrique et électronique du véhicule. Ainsi, les thèmes discutés longuement sont, dans la situation de travail étudiée, une aide à la définition des fonctions principales (c'est-à-dire des aspects liés à l'utilité) du futur système.

Les liaisons entre les objectifs de formation et les ressources pédagogiques utilisées nous ont permis, dans une certaine mesure, de construire des « patterns » d'utilisation des ressources pédagogiques. Ces liaisons ont également montré quelques limitations des ressources physiques existantes. Ainsi, nous avons pu spécifier plusieurs fonctions secondaires de l'interface du futur dispositif de RA. A titre d'exemple, l'utilisation d'annotations pour compléter la présentation de l'architecture électrique et électronique du véhicule, ainsi que l'association entre la ressource interactionnelle « information » et l'objectif « décrire le fonctionnement du véhicule » a servi à la spécification de fonctions secondaires telles que « présenter la fonction des calculateurs par des étiquettes virtuelles » ou « présenter le flux d'informations entre les calculateurs par des symboles graphiques dynamiques ».

Un autre apport des observations de l'activité en tant que méthode d'analyse des besoins de technologies émergentes est l'acquisition de connaissances sur le vocabulaire utilisé par les opérateurs, les contraintes physiques de la situation de travail, etc. Ces données n'ont pas été exposées dans cette thèse puisque trop spécifiques pour le domaine de la maintenance automobile. Cependant, complétées par des informations obtenues à partir des supports pédagogiques, elles ont été très utiles pour la définition et la description des entités

virtuelles du futur système de RA (par exemple, les caractéristiques graphiques des objets présents dans la scène virtuelle, le texte sur les étiquettes virtuelles, etc.). Dans ce sens, l'observation de l'activité en situation réelle de formation se révèle une méthode qui aide la définition de certains aspects liés à l'utilisabilité de la technologie émergente.

Cependant, les informations obtenues par des observations sont très riches. C'est pourquoi leur analyse était particulièrement longue, difficile à organiser et à présenter dans une forme facilement utilisable par les concepteurs. L'analyse des observations en situation réelle de formation a pris, en effet, environ quatre fois plus de temps que l'analyse des entretiens. Ce résultat, bien que concordant avec des conclusions d'autres recherches (par exemple, Diaper, 2001), est également lié à notre technique de codage qui visait une description assez détaillée de l'activité de formation. L'unité d'analyse choisie (l'épisode d'utilisation des ressources pédagogiques, délimité par le changement de ressources) découpe l'activité des acteurs de la formation en séquences d'actions trop courtes, ce qui allonge sensiblement le temps de codage et d'analyse. En perspective, il serait intéressant de réfléchir sur des techniques d'analyse des données en situation réelle de formation, qui intègrent, dans une plus grande mesure, des contraintes temporelles, typiques pour un projet de conception.

Chapitre 6

L'analyse des besoins au moyen de l'évaluation d'un prototype³²

Introduction

Grâce à l'analyse de l'activité de formation et conformément aux orientations décrites dans les chapitres 4 et 5, une tâche de formation a été choisie en concertation avec l'équipe de conception et implantée dans un prototype. La tâche implantée concerne la présentation du fonctionnement et du diagnostic des lampes à décharge³³. Le prototype de RA devrait aider le formateur dans sa présentation du fonctionnement de ces lampes en mode nominal et en mode dégradé.

Le système technique, qui implique les lampes à décharge, gère le rabattement du faisceau des feux de croisement en fonction de la vitesse. En mode nominal, cette fonction pourrait être synthétisée de la manière suivante : lorsque le véhicule est à l'arrêt ou à une vitesse inférieure à 10 km/h, le faisceau lumineux adopte une position relativement basse ; à une vitesse de 11 km/h à 30 km/h, le faisceau adopte une position moyenne ; au-dessus de 30 km/h, le système relève le faisceau à une hauteur maximale. Le but de cette fonction est d'améliorer les performances d'éclairage. Cinq calculateurs et plusieurs capteurs sont impliqués dans le fonctionnement et la gestion de cette tâche, ce qui génère plusieurs types de pannes possibles (Renault, 2005).

³² Ce chapitre a donné lieu à une publication (Anastassova, Burkhardt, Breda, & Mégard, 2006).

³³ Les lampes à décharge regroupent les sources lumineuses dont la production de lumière ne vient pas ou pas seulement de la température des matériaux. Selon le type, on distingue, par exemple, la photoluminescence, l'électroluminescence. En effet, la production de la lumière se fait principalement par des processus chimiques ou électriques (ex. : xénon, Renault, 2005).

La tâche de formation présentée ci-dessus a été modélisée à l'aide du formalisme Groupware Task Analysis (GTA, van der Veer & van Welie, 1999). Cette méthode d'analyse et de description hiérarchique des tâches a été choisie, puisque particulièrement adaptée à la description de tâches collectives. De plus, un support logiciel d'aide à la modélisation en utilisant de ce formalisme existe. GTA repose sur un nombre de concepts (tâche, acteurs, etc.) qui sont décrits à partir des données obtenues au moyen d'observations dans une situation de référence ou sur le terrain, où sera introduit le futur prototype (plus d'informations sur le formalisme sont disponibles dans van der Veer *et al.*, op. cit.). Plus de détails sur la formalisation de la tâche et les spécifications fonctionnelles et de l'interface du prototype peuvent être trouvés dans Anastassova (2005b).

A partir des spécifications fonctionnelles, un prototype de RA a été développé dans le cadre d'un stage d'informatique (Guillemet, 2005). Le prototype était composé d'une petite caméra d'ordinateur (web cam) filmant un véhicule didactique physique, un ordinateur traitant les images filmées et générant les entités virtuelles et des interfaces d'entrée classiques (clavier et souris). Les images du véhicule physique, ainsi que les entités virtuelles superposées, étaient projetées sur un grand écran afin que tous les stagiaires et le formateur puissent voir la scène « augmentée ». Le dispositif permettait au formateur d'« ajouter », sur le véhicule physique et en temps réel, des indications virtuelles concernant l'emplacement des calculateurs, les liens logiques entre eux, le flux d'information. Le formateur pouvait également introduire une panne « virtuelle » et montrer ses conséquences sur le fonctionnement du système. Ce prototype, très limité et instable d'un point de vue technique, n'a pas pu être évalué avec ses futurs utilisateurs. Il leur a été simplement présenté lors d'une réunion. Les formateurs ont émis très peu de critiques et ont exprimé une forte motivation d'utiliser un tel dispositif, ce qui était une information importante pour l'acceptabilité du futur système. Également, 7 nouvelles idées d'applications possibles ont été évoquées. Elles concernaient principalement l'aide à la présentation du fonctionnement dynamique de pièces mécaniques (par exemple, mouvements et circulation du gazole dans un système de pompage moteur K9K, fonctionnement d'une boîte automatique, etc.). Cependant, la réunion était peu formalisée et, pour cette raison, n'a pas pu servir comme base de réflexion sur l'évaluation de prototype en tant que moyen d'analyse des besoins de technologies émergentes.

C'est pourquoi, un autre prototype développé également par le CEA – LIST en partenariat avec Alstom, a été évalué du point de vue de sa qualité ergonomique. Notons qu'il s'agissait ici d'un premier prototype qui devait être redéveloppé et amélioré par la suite, notamment grâce aux résultats de l'évaluation ergonomique et aux suggestions des utilisateurs. Le dispositif, qui sera décrit d'une manière plus détaillée plus loin dans la thèse, devait assurer le guidage procédural de techniciens novices lors d'une tâche particulière de maintenance de trains. Le dispositif « augmentait » un transformateur électrique physique en rendant visibles et en annotant certaines parties cachées du transformateur. De cette manière, le prototype devait également servir à la formation rapide sur le tas. Dans ce cas, l'avantage attendu de la RA par rapport à une procédure en papier est la réduction du nombre d'erreurs et du temps de recherche et de traitement de l'information grâce à la présentation de consignes contextualisées en temps réel, au moment et à l'endroit appropriés. L'évaluation ergonomique de ce prototype est présentée ci-après.

6.1. Objectif de l'étude et questions de recherche

Notre étude a pour but d'évaluer l'utilité et l'utilisabilité d'un prototype de RA. Au-delà de l'évaluation empirique du prototype tel qu'il existe, c'est-à-dire à un certain stade de son évolution (et non à un stade jugé terminal), notre problématique est de contribuer à une réflexion plus générale sur l'usage et l'utilité de la RA pour le guidage dans l'exécution de procédures et pour la formation rapide sur le poste de travail. Egalement, les résultats de l'évaluation doivent servir à la reconception du prototype développé dans le cadre d'une coopération entre un partenaire industriel et plusieurs laboratoires de recherche. D'un point de vue méthodologique, l'étude a indirectement pour but de réfléchir aux apports et limites des tests de prototypes, impliquant des utilisateurs, comme méthode d'évaluation, d'une part, et comme méthode d'analyse des besoins, d'autre part.

6.2. Méthodologie

Sujets

Au moment de la réalisation de l'étude, la participation des futurs utilisateurs « réels » ou représentatifs (c'est-à-dire des techniciens spécialisés dans la maintenance de trains) était

peu envisageable pour deux raisons : (1) le partenaire industriel n'exprimait pas une volonté claire de fournir des participants aux tests ; (2) le prototype était techniquement et fonctionnellement trop immature, et ce fait engendrait un risque de rejet de la technologie. Ce point est très important. Le risque de rejet a, en effet, été observé fréquemment en d'autres situations d'évaluation expérimentale de prototypes encore trop éloignés d'une version finale ou, du moins, d'une version proche de l'état final attendu. Dans notre cas, ni Alstom, ni le CEA-LIST, ne souhaitait, à juste titre, une évaluation avec de réels futurs utilisateurs potentiels. Outre le risque de rejet, les comportements des utilisateurs d'un prototype immature ont peu de similitude avec ceux probables d'utilisateurs d'un produit achevé, en situation d'emploi réel. Ceci pour dire que les leçons à tirer d'une telle expérimentation doivent être plus qualitatives (en termes d'hypothèse techniques, par exemple) que quantitatives (en termes de gains de performance).

Par conséquent, les tests ont été réalisés avec 10 sujets (6H, 4F), tous ingénieurs en informatique et en électronique dans un des laboratoires de recherche participant au projet. Ils ont été répartis aléatoirement en deux groupes de 5 sujets en fonction du guidage utilisé : le premier groupe ne disposait que d'instructions en papier (groupe PAP), tandis que le deuxième utilisait le prototype de RA afin de réaliser la tâche assignée (groupe RA).

L'âge des sujets varie entre 26 ans et 46 ans ($M = 30$, $Ety = 6$). Ils ont une certaine connaissance des technologies de RA par leur culture scientifique, mais ne sont pas familiarisés avec leur utilisation. Tous les sujets ont un niveau d'études élevé (Bac + 5 ou plus) et une bonne connaissance de la langue anglaise. Aucun ne présente de problèmes visuels particuliers.

Le nombre relativement faible de sujets pourrait est dû aux contraintes inhérentes au projet, exposées plus haut, et par la nécessité de mener une évaluation assez rapide. Compte tenu d'une orientation plus qualitative que quantitative donnée à cette évaluation, la taille de l'échantillon n'est pas essentielle. D'ailleurs, ne dit-on pas que 5 sujets sont suffisants pour cerner 85% des problèmes d'utilisabilité d'un produit (Nielsen, 2000) ?

Tâche à réaliser

La tâche à réaliser est une tâche de démontage de la partie latérale et du câblage d'un transformateur électrique présenté par une maquette à taille réelle. La tâche et la maquette

physique sont identiques dans la condition « procédure papier » et dans la condition « procédure en RA ». La tâche comporte 9 étapes, une étape consistant en une ou plusieurs actions élémentaires (ex. : vissage, desserrage, etc.). Notre analyse se concentre sur les 8 premières étapes car la maquette physique disponible pour l'expérimentation ne permet pas la réalisation de l'étape 9. En effet à cette étape, il s'agit de retirer un câble qui n'est pas présent sur la maquette. Notons que ce type de tâche n'est pas particulièrement difficile pour nos sujets.

Matériel et prototype de RA évalué

La consigne pour la tâche est présentée (en format papier et en format électronique) en anglais puisque le produit est destiné d'abord à de futurs utilisateurs anglophones. La procédure papier est imprimée sur deux feuilles A4 au recto.

En RA, l'utilisateur a accès à la procédure par l'intermédiaire d'une interface WIMP (Windows, Icons, Menus, Pointing). Dans une fenêtre centrale sont affichés l'image du transformateur, un modèle numérique en 3 dimensions (3D) de celui-ci, ainsi que d'autres entités virtuelles (ex. : texte, flèches dynamiques et statiques). Dans une deuxième fenêtre, sous la fenêtre principale, apparaît le texte de la procédure à suivre (fig. 25). Des boutons de contrôle (« Mise en marche / Arrêt de la vidéo », « Arrêt », « Précédent », « Suivant ») concernant le contrôle du défilement du texte, et « Effacer ») apparaissent au dessus et à droite de la fenêtre principale.

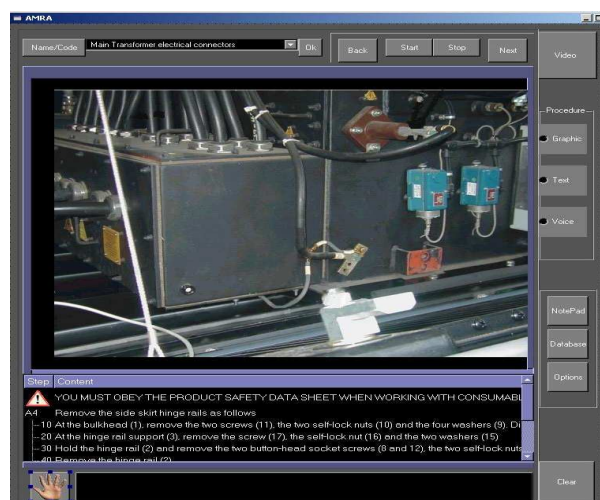


Fig. 25. Ecran principal du logiciel de RA

Le dispositif d'entrée d'information utilisé est un stylet. A l'aide du stylet, l'utilisateur valide une étape de la procédure afin de passer à la suivante et fait apparaître des indications textuelles sur les noms des pièces. Les animations se déclenchent automatiquement avec le passage d'une étape de la procédure à l'autre.

L'architecture matérielle du système de RA utilisé est la suivante : une caméra haute définition fixée sur un ordinateur portable (Tablette PC) filme une maquette du transformateur électrique à taille réelle. La scène filmée est affichée en temps réel sur l'écran de l'ordinateur portable et enrichie par des éléments virtuels. En raison de la puissance limitée des Tablette PC actuels et des ressources nécessitées par les algorithmes de traitement, une délocalisation des calculs vers un PC distant est nécessaire. Par conséquent, les différents éléments sont reliés par plusieurs câbles. Au total, le dispositif porté par l'utilisateur pèse 2 kg, soutenu par une sangle passée derrière le cou (fig. 26).



Fig. 26. Le dispositif de RA porté par un sujet

Procédure

Les passations individuelles sont encadrées par deux ergonomes. Le premier filme l'utilisateur, tandis que le deuxième donne, si nécessaire et à la demande, des explications sur le vocabulaire et le fonctionnement du prototype.

Après une courte présentation de la tâche à réaliser, l'utilisateur est laissé libre afin de se familiariser avec le matériel. Ensuite, l'expérimentateur précise au sujet qu'il doit effectuer sur le transformateur une partie des opérations décrites dans la procédure sans contrainte de

temps particulière. Il est demandé au sujet d'accompagner l'exécution de la tâche par une explication à haute voix. Les sujets sont libres de poser tout type de questions relatives au vocabulaire et à l'utilisation du système de RA. Les sujets qui utilisent le guidage en RA passent ensuite un entretien portant sur l'utilité du prototype pour la tâche de maintenance, sur les caractéristiques de l'interface (animations, recalage, etc.) et sur d'éventuelles propositions d'amélioration.

Données recueillies et méthode d'analyse

Les données recueillies sont issues, d'une part, des enregistrements vidéo des passations individuelles et, d'autre part, des entretiens post-expérimentaux retranscrits verbatim et analysés. Malheureusement, à cause de contraintes matérielles, et pour ne pas gêner le sujet, l'écran du dispositif de RA et les actions de l'utilisateur sur l'interface n'ont pas pu être filmés. De plus, les fichiers logs ne sont pas exploitables à des fins d'évaluation ergonomique, car une telle utilisation n'avait pas été prévue par les concepteurs du système.

L'analyse des enregistrements vidéo concerne des indicateurs de performance tels que le nombre d'étapes réalisées ; le nombre de déviations de la procédure prescrite ; le temps total de réalisation de chaque étape. Ce dernier se décompose 1) en temps de compréhension de la procédure, mesuré à partir du moment où le sujet prend connaissance de la consigne jusqu'au moment où il débute la réalisation manuelle de la tâche, et 2) en temps de manipulation de la maquette réelle.

Les stratégies des sujets sont analysées à partir de la fréquence des allers-retours du regard entre la maquette et le dispositif d'affichage de la procédure ; le type de questions posées (par exemple, concernant le prototype de RA et la maquette physique, des demandes d'approbation et de traduction) ; les déplacements et les postures adoptées pendant la réalisation de la tâche.

Enfin, les entretiens ont été analysés selon leur contenu thématique. L'unité d'analyse est définie par l'idée principale exprimée et délimitée par le changement d'idée. Trois grands thèmes se dégagent :

- les difficultés rencontrées par les sujets,

- les avantages du prototype évoqués,
- les améliorations suggérées.

Le choix a été fait de faire reposer l'analyse sur des indicateurs statistiques uniquement descriptifs, dans la mesure où le recours à l'inférence (F de Snedecor, t de Student ou encore Chi2) n'est aucunement justifié par les conditions de l'étude expérimentale.

6.3. Résultats

Nous ne présentons ici que les résultats qui nous permettent de répondre aux questions de recherche posées. D'autres résultats, ainsi que des analyses plus détaillées, sont exposés dans Breda (2005) et Anastassova *et al.* (2006).

Performances dans la réalisation de la tâche : une supériorité globale de la condition papier

Pour les analyses qui suivent, nous avons retenu uniquement les étapes réalisées par au moins 4 sujets dans chaque condition. Les étapes 5 et 7 ont été abordées par très peu de sujets, puisque les consignes respectives étaient ambiguës et, par conséquent, ont été interprétées différemment par les différents participants.

Globalement, il faut, en moyenne, 20 % de temps en plus avec la RA pour réaliser l'ensemble d'une étape par comparaison avec la procédure papier ($M t_{\text{pap}} = 101\text{s}$, $Ety_{\text{pap}} = 40\text{s}$ vs. $M t_{\text{ra}} = 121\text{s}$, $Ety_{\text{ra}} = 83\text{s}$). Une analyse détaillée de l'activité du sujet à chaque étape confirme cette même supériorité en termes de vitesse de lecture et de compréhension de la procédure, la différence étant encore plus importante (50% de temps en plus, ($M t_{\text{pap}} = 53\text{s}$, $Ety_{\text{pap}} = 34.6\text{s}$ vs. $M t_{\text{ra}} = 80\text{s}$, $Ety_{\text{ra}} = 72\text{s}$). Mais d'une manière générale et dans les deux conditions, le temps moyen de compréhension de la procédure est plus long que le temps de manipulation effective de la maquette réelle. Dans la condition « papier », cette différence est légère ($M t_{\text{pap}} = 53\text{s}$, $Ety_{\text{pap}} = 34.6\text{s}$ vs. $M t_{\text{pap}} = 51\text{s}$, $Ety_{\text{pap}} = 24.9\text{s}$). Dans la condition « RA », cette différence est plus prononcée ($M t_{\text{ra}} = 80\text{s}$, $Ety_{\text{ra}} = 72\text{s}$ vs. $M t_{\text{ra}} = 44\text{s}$, $Ety_{\text{ra}} = 36\text{s}$).

Au cours de l'expérimentation, le groupe PAP commet autant d'erreurs que le groupe RA. En revanche, la distribution des erreurs est différente dans les deux groupes. Ainsi, les

sujets du groupe RA dévient de la procédure uniquement à l'étape 3, tandis qu'aucune erreur n'est constatée à cette étape dans la condition « papier ».

Stratégies et comportements observés

Le nombre de questions posées en moyenne à chaque étape est plus élevé en RA que dans le groupe PAP ($M_{\text{pap}} = 5.7$, $Ety_{\text{pap}} = 2$ vs. $M_{\text{ra}} = 9.3$, $Ety_{\text{ra}} = 8$). Quand les sujets travaillent avec une procédure papier, ils posent plus de questions relatives à la maquette ($TDL = 0.22$) et également plus de questions de traduction / localisation ($TDL = 0.19$). Quand les sujets travaillent en RA, leurs questions portent majoritairement sur l'utilisation du dispositif ($TDL = 0.60$). Le nombre de questions d'approbation ne diffère pas en fonction de la condition ($TDL = 0.03$).

Les sujets en condition « RA » passent en moyenne 56% de leur temps en restant debout ($Ety = 15\%$), 42% de leur temps en étant accroupis ($Ety = 16\%$) et 2% en étant debout penchés en avant ($Ety = 2\%$). De leur côté, les sujets en condition « papier » passent en moyenne 25% de leur temps en étant debout ($Ety = 12\%$), 71% de leur temps en étant accroupis ($Ety = 13\%$) et 4% en étant debout penchés en avant ($Ety = 3\%$). En moyenne, les sujets en condition « papier » changent plus souvent de posture ($M_{\text{pap}} = 2.02$, $Ety_{\text{pap}} = 1.14$) que les sujets en condition « RA » ($M_{\text{ra}} = 1.67$, $Ety_{\text{ra}} = 0.96$).

Les données des entretiens

Dans les entretiens post-expérimentaux, les sujets évoquent essentiellement des problèmes relatifs au recalage (33% des difficultés soulignées par les sujets, fig. 27). Comme mentionné lors de la revue de la littérature sur la RA pour l'apprentissage, le recalage est un processus technique, dont l'objectif principal est de faire coïncider visuellement, haptiquement ou auditivement les objets du monde réel aux enrichissements qui leur sont associés.

Quatre sujets sur les 5 interrogés affirment ne pas avoir utilisé le recalage pour réaliser la tâche. Ils disent avoir été guidés par les informations disponibles dans la procédure papier, ainsi que par celles obtenues du modèle 3D du transformateur ou de la maquette réelle de celui-ci.

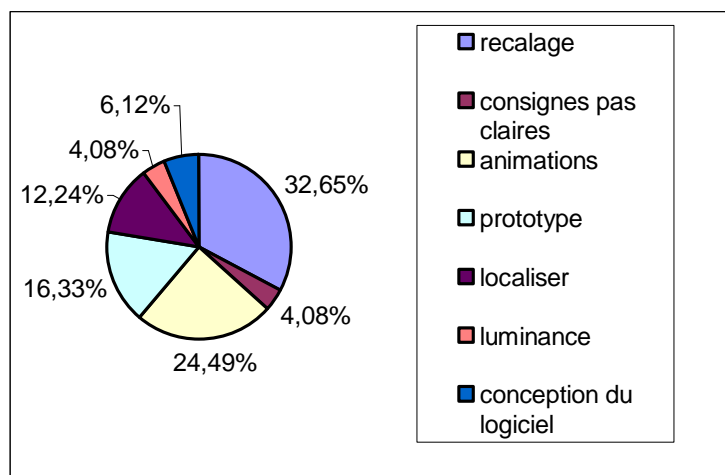


Figure 27. Répartition des types de difficultés rencontrées évoquées au cours des entretiens (d'après Breda, 2005)

La conception des animations semble également avoir été problématique (25% des difficultés évoquées). Tous les sujets mentionnent cet aspect au cours des entretiens. Les animations sont jugées trop rapides et pas assez claires d'un point de vue sémantique. Trois sujets évoquent des problèmes relatifs au prototype de RA : le dispositif est jugé encombrant, peu utilisable et peu utile pour la tâche de maintenance. D'autres difficultés rencontrées sont liées à des problèmes de localisation des pièces à manipuler (typiquement, des problèmes que le recalage devait résoudre). D'autres difficultés exposées moins souvent concernent la clarté de la procédure, l'éclairage du local de l'expérimentation et l'utilisabilité de l'interface du logiciel de RA (« conception du logiciel sur la fig. 26). Les sujets soulignent que le logiciel n'offre pas d'aide et que, globalement, l'interface est trop complexe.

Comparativement au nombre de problèmes évoqués, trois fois moins de suggestions d'amélioration ont été émises. Elles concernent principalement la conception des animations (par exemple, l'ajout de flèches indicatives, le changement de couleurs) et le recalage. Il est intéressant de noter que deux sujets suggèrent de ne pas se servir du recalage pour la tâche à réaliser.

6.4. Limites de l'étude

Cette recherche a d'emblée plusieurs limites, qu'il faut prendre en compte pour nuancer les résultats de cette évaluation. D'abord, l'échantillon d'utilisateurs est assez petit et

composé de non-spécialistes de la tâche et de la technologie. Ensuite, le dispositif technologique est peu fonctionnel et instable. Enfin, les conditions d'évaluation sont différentes de celles dans une situation réelle de maintenance de trains.

6.5. Discussion

Le prototype de RA ne semble pas améliorer l'exactitude et la rapidité des sujets quant au suivi de la procédure. Les utilisateurs de la technologie réalisent la tâche plus lentement et commettent autant d'erreurs que les sujets travaillant à l'aide d'une procédure papier classique.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées afin d'expliquer ces résultats. Une première est liée à la nouveauté de la technologie testée qui pourrait exiger un certain temps de familiarisation. En outre, il se peut que cette nouvelle technologie suscite un intérêt plus fort et capte plus d'attention que la tâche de maintenance elle-même, d'autant que les utilisateurs sont des ingénieurs travaillant dans le domaine des NTIC. Une deuxième interprétation, moins flatteuse pour le prototype de RA, concerne ses défauts d'utilisabilité (poids, contrainte de la position verticale, relative incompatibilité du Tablette PC et du stylet avec les tâches manuelles de maintenance, etc.). De tels défauts, inhérents au fait qu'il s'agit d'un prototype encore très éloigné de sa version finale, ne sont pas prédicteurs des performances ultérieures. On peut raisonnablement penser que les performances avec un outil nettement amélioré ne pourront être que supérieures à celles obtenues ici.

Une troisième piste pour expliquer ces résultats est à rechercher dans le recalage lent de l'image réel et le modèle 3D virtuel. Ce problème est évoqué dans les entretiens. Nous pouvons nous interroger sur la valeur ajoutée du recalage précis, processus technique exigeant beaucoup de ressources machine, pour des tâches de maintenance simples telles que le vissage et le dévissage, pourtant considérées comme des applications privilégiées de la RA.

Il ne s'agit pas ici de prendre une position anti-technologique, mais d'insister sur la nécessité d'un meilleur choix des tâches à implanter dans les prototypes, une exploitation plus efficace des caractéristiques des objets physiques dans l'environnement ainsi qu'une modélisation plus adéquate des objets virtuels utilisés. Cette affirmation nous amène naturellement vers une réflexion sur la mise en œuvre des tests avec des utilisateurs, quand il

s'agit d'évaluer l'ergonomie de prototypes peu matures de technologies émergentes ou de d'utiliser ces mêmes prototypes pour générer de nouveaux besoins.

6.6. Considérations méthodologiques et perspectives

Les résultats des tests rapides avec des utilisateurs montrent que cette méthode a plusieurs avantages quand il s'agit d'évaluer l'ergonomie d'un prototype en amont de la conception d'une technologie émergente. D'abord, ces tests ont un apport indéniable à l'évaluation de l'utilité et de la compatibilité de l'application avec la tâche. Ainsi, dans notre cas, ils ont montré que le recalage rigoureux de l'image réelle et des entités virtuelles serait peu utile pour des tâches simples, ne demandant pas le guidage précis de gestes fins (par exemple, une grande majorité des tâches de montage et de démontage). Dans notre contexte, c'est une information importante orientant les concepteurs vers une meilleure prise en compte d'une partie des besoins des futurs utilisateurs de la technologie. Ce résultat a également une portée plus générale, puisque certaines définitions de la RA vont jusqu'à assimiler cette technologie au processus de recalage. Or, nous montrons que le recalage précis n'engendre pas un gain important pour l'utilisateur dans les contextes mentionnés plus haut. L'apport des tests avec des utilisateurs à la définition d'aspects liés à l'utilité du futur système est d'autant plus appréciable que les technologies émergentes, en générale, et la RA, en particulier, sont des technologies en recherche d'applications.

Ensuite, en pointant les insuffisances apparentes du prototype, les tests ergonomiques avec des utilisateurs pourraient se révéler un moteur d'innovation. Dans le domaine des sciences de gestion, Drucker (1998) avance l'idée que l'innovation est rarement le produit d'une inspiration momentanée. Au contraire, elle serait le résultat d'une recherche consciente et organisée de possibilités d'innovation dans plusieurs directions dont une concernant des incompatibilités entre les attentes des utilisateurs et les caractéristiques des outils de travail existants.

Toutefois, comme lors de notre évaluation ergonomique, l'utilisateur risque de se focaliser sur les aspects négatifs du prototype et, ainsi, de donner peu de suggestions d'amélioration. Dans notre cas, comparativement au nombre de problèmes évoqués, trois fois moins de suggestions d'amélioration ont été émises. Une direction possible pour dépasser cette focalisation extrême sur les points négatifs du dispositif serait de le présenter aux

utilisateurs dans le cadre de groupes de discussions. Dans ce contexte plus ouvert, nous pourrions attendre plus de suggestions constructives et moins de critiques des insuffisances apparentes de la technologie. Une confirmation de cette hypothèse, bien que non démontrée expérimentalement, pourrait être trouvée dans la présentation, lors d'une réunion avec les formateurs, du prototype d'aide à la démonstration du fonctionnement des lampes à décharge, développé dans le cadre de notre thèse. Comme mentionnée plus haut, lors de cette réunion, très peu de critiques du dispositif ont été émises. En revanche, sept nouvelles idées d'applications possibles de la technologie ont été évoquées (pour plus de détails sur les idées suggérées voir plus haut, dans l'introduction de ce chapitre).

Un autre risque de la focalisation sur les aspects négatifs d'un prototype immature lors de tests avec des utilisateurs, notamment quand le prototype est comparé avec une technologie plus traditionnelle que les opérateurs sont habitués à utiliser, réside dans la stigmatisation du prototype innovant comme moins performant que la technologie traditionnelle. Une direction possible pour dépasser cette limite, suggérée par Rönkko *et al.* (2006) à propos de l'évaluation d'environnements virtuels, est de comparer les performances des utilisateurs testant la technologie émergente non pas à celles d'un groupe utilisant une technologie traditionnelle, mais en s'appuyant sur des critères de performance qui prennent en compte les insuffisances du prototype. Ces critères, spécifiques pour chaque tâche, peuvent être établis par des ergonomes et des experts de la tâche, par exemple. L'analyse de l'activité future ou d'une situation existante pourrait être une aide précieuse pour l'établissement de ces critères.

Enfin, comme le souligne Muller (2002), les tests d'un prototype relativement immature peuvent être utiles, puisqu'ils laissent à l'utilisateur une marge de manœuvre beaucoup plus grande que si le prototype est assez proche de sa version finale. L'utilisateur prendrait plus d'initiative d'explorer le dispositif, ce qui l'inciterait à « concevoir par l'action » (« design-by-doing ») et à contribuer plus fortement à la reconception. Cette observation est évidemment transposable à l'activité et à la marge de manœuvre des concepteurs. Ils seraient moins limités dans les choix technologiques envisageables avec une version immature d'un prototype qu'avec une version presque terminée de ce même prototype. Une version très proche de la version finale d'un dispositif permet difficilement une remise en cause des choix techniques déjà faits et réduit les possibilités de correction ou

d'évolution. En ce sens, les prototypes immatures pourraient se révéler moteurs d'innovation à un coût relativement réduit.

Cette réflexion n'est pas toujours extrapolable aux prototypes de RA existants. Comme montré lors de la revue de la littérature, ces prototypes sont effectivement assez immatures dans la grande majorité des cas, ce qui, suite à des tests ergonomiques impliquant des utilisateurs, pourrait certainement favoriser la recherche de solutions innovantes. Cependant, une partie des dispositifs de RA aujourd'hui visent « l'augmentation » des capacités sensorielles de l'humain (par exemple, la perception tactile, la perception visuelle, etc.). Or, la simulation de cette interaction sensorielle est souvent difficilement réalisable, voire impossible, avec des prototypes immatures. De nouvelles recherches doivent être réalisées afin de proposer des méthodes d'analyse des besoins et d'évaluation qui exploitent suffisamment les possibilités d'innovation offertes par les prototypes immatures, tout en permettant la simulation d'interactions sensorielles homme – machine réalistes.

Également, les indicateurs comportementaux utilisés pendant les tests avec des utilisateurs, notamment le temps de réalisation de la tâche et le nombre d'erreurs, bien qu'informatifs, sont insuffisants dans un objectif d'évaluation formative et d'aide à l'analyse des besoins. D'abord, les prototypes sont extrêmement variés et peu nombreux, donc difficiles à comparer, de même que les études sont difficiles à dupliquer. Ensuite, l'immaturité de la technique rend le travail d'évaluation assez complexe. Par exemple, dans notre cas, l'instabilité et le nombre limité de fonctions du dispositif a introduit la nécessité d'avoir deux évaluateurs travaillant en même temps. Dans d'autres situations, cette même contrainte pourrait également réduire les possibilités de construire des tâches expérimentales tant soit peu réalistes et informatives pour les besoins et les difficultés des utilisateurs. De surcroît, comme mentionné lors de la revue de la littérature, quand il s'agit de technologies émergentes, le recrutement de sujets « représentatifs » est une tâche nécessaire mais peu facile sur le terrain. Enfin, une grande partie des sujets recrutés n'a pas d'expérience avec le système. En conséquence, les performances varient fortement et les résultats des tests d'évaluation peuvent se révéler peu profitables aux concepteurs, étant donné qu'aucune tendance ne se dégage clairement, aussi bien en termes de besoins qu'en termes de performances. Pour ces raisons dans le cadre de reconception de technologies innovantes, une analyse détaillée et qualitative des stratégies d'utilisation et des difficultés rencontrées par

chaque utilisateur semble plus appropriée qu'une analyse purement quantitative en termes de performances. Ce type d'analyse pourrait se révéler plus profitable pour les concepteurs à la fois dans le cadre d'évaluations formatives et dans le cadre d'évaluations sommatives. En testant des prototypes peu matures de technologies plus traditionnelles, Ward (1994) arrive aux mêmes conclusions.

L'analyse des stratégies d'utilisation pourrait se faire dans un contexte expérimental (tests contrôlés avec des utilisateurs) ou suite à des observations continues dans des laboratoires d'usage, où les technologies sont mises librement à la disposition de leurs futurs utilisateurs. La deuxième situation d'évaluation, bien que très attirante dans une perspective de reconception et de « création » de besoins, se heurte, à notre avis, à au moins deux problèmes. D'une part, le prototype mis librement à disposition des utilisateurs doit être suffisamment mature pour que ces derniers aient la motivation de l'utiliser en développant ainsi des stratégies d'usage suffisamment intéressantes pour la conception. D'autre part, dans le cadre d'observations des usages, la technologie innovante doit être perçue comme utile par ses futurs utilisateurs. Dans le cas contraire, cette technologie risque d'être utilisée rarement d'une manière spontanée. Cet effet a été observé lors de l'évaluation ergonomique d'un prototype innovant qui devait servir à la communication synchrone et asynchrone dans une équipe de travail. Le prototype était mis à la disposition de ses futurs utilisateurs qui travaillaient tout en étant observés constamment dans un laboratoire d'usage. Bien que relativement mature, ce prototype n'a été utilisé d'une manière spontanée que deux fois pendant une période d'observation de deux mois (Anastassova, 2002). Une interprétation possible de ce résultat réside dans le fait que le dispositif était installé dans un environnement hautement technologique proposant une multitude de moyens de communication, qui satisfaisaient pleinement les besoins d'échange et de contact des utilisateurs. Pour cette raison, la technologie innovante était estimée peu utile et, par conséquent, était utilisée rarement.

Une autre difficulté des tests avec des utilisateurs dans le contexte de nombreuses technologies émergentes, à la fois dans une perspective d'analyse des besoins et d'évaluation, est la mobilité d'une grande partie des systèmes à tester. Cette spécificité complique notablement le travail d'évaluation. Les défis majeurs étant l'enregistrement des différents comportements de l'utilisateur, le contrôle du contexte physique (ex. éclairage,

environnement sonore, etc.) et la création de scénarios écologiques d'évaluation ou de démonstration du fonctionnement de la technologie (Isomursu, Kuuti, & Väinämö, 2004). Afin de relever un maximum de comportements utilisateur dans une situation « écologique » d'interaction, les chercheurs s'orientent majoritairement vers le port, par l'utilisateur même, de dispositifs d'enregistrement assez lourds, par exemple plusieurs caméras plus ou moins miniaturisées filmant les différentes actions du sujet. L'utilisation des fichiers log est également une des techniques employées pour l'enregistrement des comportements d'utilisateurs en interaction avec des systèmes mobiles (Isomursu *et al.*, op. cit.). Cependant, augmenter l'appareillage d'enregistrement porté par le sujet, au motif de mieux capter ses comportements, risque aussi de créer une contrainte de poids ou d'encombrement, source évidente de biais. Les problèmes du contrôle de l'environnement physique et la prise en compte des interactions avec celui-ci trouvent peu de solutions satisfaisantes, notamment si les évaluations sont conduites à l'extérieur.

Les tests avec des utilisateurs de technologies émergentes se heurtent également à d'autres types de contraintes. Ainsi, comme pour l'étude exposée dans ce chapitre, les contraintes temporelles de conception et la position généralement technocentrée des décideurs imposent des évaluations ergonomiques avec de petits échantillons composés fréquemment d'ingénieurs qui ont travaillé sur le projet (par exemple, Kaufmann & Schmalstieg, 2003). Cette limitation entraîne plusieurs inconvénients. Le premier réside dans les connaissances souvent limitées qu'ont les sujets testeurs concernant les tâches réelles des futurs utilisateurs. Le second est l'impossibilité de généraliser les résultats de l'évaluation. Le troisième est une faible « productivité » dans ce contexte en ce qui concerne le nombre de problèmes d'utilisabilité détectés (une douzaine dans notre cas). Certains auteurs avancent l'idée que les conclusions de Nielsen (2000) sur le fait que cinq sujets suffisent pour détecter 85% des défauts d'utilisabilité ne seraient valables que si tous les problèmes ont la même probabilité d'être détectés, si tous les utilisateurs ont la même capacité à découvrir ces problèmes et ce, pour des technologies déjà assez bien maîtrisées par les sujets (Woolrych & Cockton, 2002). Une telle configuration paraît peu probable dans le cadre d'évaluations de technologies émergentes, puisque l'expérience de leur utilisation varie beaucoup d'un sujet à un autre. Également, comme dans le cadre d'évaluations ergonomiques de technologies plus classiques, les résultats des tests utilisateurs sont fortement conditionnés par la tâche expérimentale assignée aux sujets. Or, quand il s'agit de technologies émergentes, le choix de ces tâches est

fortement contraint par les scénarios d'utilisation, généralement assez limités, implantés dans les dispositifs. On ne peut donc qu'insister ici sur les vertus d'un échantillon de sujets sinon nombreux, du moins représentatifs des futurs utilisateurs, opérant des tests fondés sur des tâches elles-mêmes représentatives des tâches ciblées, et ce dans des contextes aussi réalistes que possible. Aucune méthode d'évaluation ou d'analyse des besoins n'étant suffisante par elle-même, une utilisation conjointe de plusieurs méthodes est nécessaire afin de mesurer d'une manière adéquate l'utilité et l'utilisabilité des technologies émergentes, et ce sur l'ensemble des critères ergonomiques (pas seulement l'utilité et l'utilisabilité, mais aussi l'efficacité, la non dangerosité, la fiabilité, la facilité d'apprentissage, etc.). En perspective, un travail sur les combinaisons de méthodes à utiliser en fonction du type et du degré de maturité de la technologie semble nécessaire.

Conclusion générale

Les recherches ergonomiques décrites dans cette thèse nous ont donné l'opportunité de travailler sur plusieurs problématiques particulièrement intéressantes. D'abord, nous avons pu aborder certaines difficultés que rencontrent aujourd'hui les techniciens et les formateurs en maintenance automobile et qui sont explicables, en partie, par les évolutions récentes de la conception et de la production de véhicules. Ensuite, nous avons pu étudier l'applicabilité d'une technologie émergente telle que la RA dans un contexte industriel réel. Cette problématique nous a amené tout naturellement vers une réflexion sur l'approche ergonomique à adopter pour analyser les besoins d'un dispositif innovant. Dans le même temps, cela nous a permis d'utiliser plusieurs méthodes d'analyse des besoins et d'étudier ainsi les apports et les limites de l'application de chacune de ces méthodes. Enfin, grâce aux recherches ergonomiques présentées dans cette thèse, nous avons pu mettre en avant la nécessité d'une meilleure prise en compte des aspects relatifs à l'utilisateur lors de la conception de technologies émergentes.

Les résultats de nos études montrent qu'aujourd'hui l'activité des mécaniciens est centrée sur le diagnostic de pannes. De même, l'activité des formateurs concerne principalement la présentation des méthodes de diagnostic. De plus, ce sont ces aspects relatifs à la recherche de pannes, notamment de l'électronique, qui engendrent souvent des difficultés dans le travail des deux groupes d'opérateurs. Une difficulté additionnelle réside dans le fait que, dans le contexte actuel de la maintenance automobile, le diagnostic et la formation au diagnostic sont réalisés dans un système socio-organisationnel complexe et hautement évolutif. Dans cette configuration organisationnelle, les opérateurs en aval tels que les mécaniciens et les formateurs sont contraints par des objectifs de travail immédiats différents de ceux des opérateurs en amont, ainsi que par l'absence, l'ambiguïté, la non exhaustivité ou la non pertinence des informations échangées à l'intérieur du système. Pour répondre à ces exigences, les opérateurs ont une nécessité constante d'acquisition rapide de savoirs nouveaux qui, par conséquent, sont peu stabilisés puisque élaborés au fur et à mesure du développement de l'objet du diagnostic (les systèmes électroniques des véhicules). Des

ressources du système aidant l'acquisition de savoirs nouveaux et en construction sont les informations sur des pannes apparues sur le terrain, utilisées souvent à la fois par les mécaniciens et les formateurs en maintenance automobile. Ce moyen d'acquisition de savoirs était un des arguments clefs qui nous a incité à définir le fonctionnement de la formation en maintenance automobile comme une communauté de pratiques et de remettre ainsi en question le rôle traditionnel du formateur comme exposant un savoir mûr et consolidé.

Bien évidemment, la dynamique et l'hétérogénéité des rôles, des buts, des tâches, des ressources à l'intérieur du système induit une complexification de l'activité de maintenance, en général, et de celle de diagnostic, en particulier. Il eut donc été certainement très intéressant d'étudier les processus cognitifs impliqués dans ce type de diagnostic, avec ou sans systèmes d'aide, et de le mettre en parallèle avec d'autres types de diagnostic, par exemple, avec le diagnostic médical, généralement réalisé dans des conditions organisationnelles et avec des ressources opératoires différentes de celles disponibles dans le contexte actuel de la maintenance automobile. Mais, d'une part, ceci ne correspondait pas à la demande supportant cette thèse, qui a été reformulée au cours du travail, et, d'autre part, une large part des diagnostics actuels dans les ateliers est réalisée par des outils dédiés. Il est clair, néanmoins, que l'emploi de ces outils implique des raisonnements de diagnostic et de compréhension des causes des pannes observées. De surcroît, les observations que nous avons réalisées des situations de formation et du travail en atelier montrent, en effet, que les diagnostics automatiquement faits ne sont ni exhaustifs, ni totalement clairs pour ceux qui doivent effectuer les opérations de maintenance. Nous avons donc, conformément à la demande, focalisé cette thèse non seulement sur l'analyse de la situation de formation et les ressources pédagogiques utilisées et utilisables (dont la RA), mais aussi sur les difficultés des formateurs à présenter, et des mécaniciens à appréhender, les symptômes des pannes et leurs causes, que justement la Réalité Augmentée devrait pouvoir rendre mieux visibles.

L'étude sur l'applicabilité de la RA dans ce contexte industriel réel, complexe et évolutif par nature, ainsi que le caractère émergent de la technologie, ont nécessité l'utilisation de plusieurs méthodes d'analyse de l'activité des opérateurs et de leurs besoins d'assistance, sur lesquelles les chapitres de cette thèse ont été centrés. Chronologiquement, nous avons commencé par des observations et des entretiens libres non enregistrés en situation de formation et en atelier, qui ne sont pas rapportés dans cette thèse, car destinés

seulement à l'acquisition (pour nous) de connaissances générales sur les objectifs opérationnels de l'activité des mécaniciens et à une familiarisation avec ce milieu professionnel. Ces entretiens et ces observations préliminaires nous ont néanmoins servi à fixer le cadre d'entretiens et d'observations plus systématiques, réalisés ensuite.

Les premiers entretiens plus systématiques étaient des entretiens semi-dirigés, basés sur une adaptation de la technique des incidents critiques de Flanagan. Cette technique nous a permis de cerner relativement rapidement les difficultés majeures rencontrées par les mécaniciens dans leur travail quotidien et, ainsi, de contribuer à (ré)orienter les applications possibles du futur système de RA. D'une part, c'était une information utile pour les concepteurs de la technologie. D'autre part, grâce à ces entretiens basés sur la technique des incidents critiques, nous avons pu mettre en évidence certains aspects de l'activité des mécaniciens (les difficultés de diagnostic de l'électronique) qui étaient peu reconnus, voire peu connus ou négligés par les services de conception de véhicules et de méthodes de diagnostic et de réparation.

Nous avons ensuite approfondi nos recherches par une analyse de l'activité de formation dans le contexte actuel de conception et de production de véhicules. L'analyse de l'activité a été réalisée en utilisant deux méthodes. Il s'agissait d'entretiens semi-dirigés avec des acteurs de la formation (formateurs, stagiaires, concepteurs de formations) et d'observations en situation réelle de formation. Les entretiens semi-dirigés ont été particulièrement utiles pour décrire et appréhender le réseau social qui est au cœur de la maintenance automobile aujourd'hui. Également, nous avons relevé les difficultés principales, ainsi que les ressources que les acteurs du réseau mettent en œuvre pour faire face aux difficultés. Dans le même temps, une grande partie des interactions entre les acteurs a été systématisée grâce à cette méthode.

Les observations en situation réelle de formation ont confirmé, complété et donné une certaine objectivité aux données obtenues par les entretiens. Également, elles ont permis de mettre en évidence le nouveau rôle des formateurs dans le contexte actuel de la maintenance automobile. Les formateurs, en effet, adoptent rarement une approche traditionnelle de la présentation des savoirs (dite approche « expositive »). Leur rôle concerne principalement la facilitation des échanges dans le groupe de formation et la transmission des informations sur des pannes apparues sur le terrain vers la conception de formations et de véhicules.

Pour les trois groupes de professionnels de la maintenance automobile concernés, ce type d'information était important puisque assurant une visibilité des contraintes des collègues de services différents et appuyant la construction d'une représentation globale du fonctionnement du système. Pour les concepteurs du futur système, ces informations étaient une aide à la définition des fonctions principales du dispositif, mais également une prise de conscience de la complexité du terrain d'application et des possibilités limitées de satisfaire rapidement et pleinement une telle demande industrielle, notamment à cause de limitations inhérentes aux technologies existantes.

Cependant, les besoins d'assistance mis en évidence par l'analyse de l'activité étaient peu nombreux et assez généraux. Également, il s'agissait principalement de besoins clairs et réfléchis d'outils ou d'informations utiles pour la préparation et l'animation des formations, tâches qui semblent par ailleurs bien maîtrisées par les opérateurs, mais qui seront probablement plus faciles à réaliser avec les outils ou les informations demandées.

Pour élargir cette analyse des besoins éventuels d'assistance par la RA, nous avons réalisé une évaluation ergonomique d'un prototype de RA d'aide à la maintenance de trains. Les résultats de cette évaluation montrent que les utilisateurs sont beaucoup plus sensibles aux défauts qu'aux possibilités d'innovation de la technologie. Encore une fois, l'analyse de l'activité des utilisateurs a principalement mis en évidence des lacunes apparentes de la technologie et, de cette manière, des besoins évidents d'assistance.

Comme montré lors de la revue de la littérature sur l'analyse des besoins, c'est ce type de besoins qui peut généralement être déduit d'une analyse ergonomique de l'activité des utilisateurs ou des opérateurs. Quand il s'agit de besoins hypothétiques ou latents vis-à-vis de technologies qui n'existent pas et d'activités qui n'existent pas non plus, comme dans notre cas, « l'ergonomie ne peut donner que des réponses théoriques et empiriques issues d'analyses provenant de situations proches » (Brangier & Bastien, 2006). Ces réponses sont forcément approximatives et difficiles à formuler, étant donné que les connaissances sur l'ergonomie des systèmes existants sont lacunaires. On se retrouve ainsi dans une situation paradoxale où l'on a, d'une part, un besoin fort de principes, de préconisations et de recommandations ergonomiques, à cause du caractère émergent de la technologie, et, d'autre part, on a peu de réponses ergonomiques concrètes à fournir aux concepteurs, puisque le

savoir de l'ergonomie s'appuie en grande partie sur l'analyse de défauts technologiques observés antérieurement ou par ailleurs.

Un autre point problématique d'une analyse de l'activité en amont de la conception d'une technologie émergente, qui n'a pas été mis en évidence dans notre thèse à cause du caractère circonscrit et ponctuelle de l'analyse des besoins, est le problème de l'intégration, d'une manière dynamique, de nouveaux besoins dans des spécifications ou des développements avancés. Ce problème est relevé par Lindgaard et *al.* (2006) à propos de la conception de technologies traditionnelles, où l'émergence de nouveaux besoins peut effectivement être une contrainte. Considéré comme une contrainte pour la conception des systèmes interactifs traditionnels, ce problème est crucial pour la conception de technologies émergentes, puisque les utilisateurs, la technologie, les tâches à réaliser avec la technologie sont des éléments qui se définissent progressivement, au fur et à mesure de l'avancement du projet. Sutcliffe (2002) nomme ce problème le « problème du monde changeant » (« the moving world problem »).

Dans le domaine des technologies innovantes, l'évolution des besoins peut avoir au moins quatre moteurs. D'abord, elle peut être provoquée par des modifications de la tâche, qui induisent de nouveaux problèmes pour les opérateurs ou qui, au contraire, résolvent certains déjà existants. Ensuite, elle peut être due à l'avancement du projet de conception lui-même et à la concrétisation progressive de besoins vagues exprimés au début. Également, comme le soulignent Brangier & Bastien (2006) et Rabardel (2005), elle peut être due aux stratégies développées par l'opérateur lors de l'usage de la technologie, qui peuvent conduire à des pratiques de contournement des prescriptions. Enfin, elle peut être une conséquence logique de changements du paysage technologique général (par exemple, une conséquence de l'introduction de dispositifs concurrents avec des fonctions similaires à celles de la technologie émergente à concevoir). L'évolution des besoins s'avère problématique pour plusieurs raisons, la plus importante étant des demandes de changements faites par des utilisateurs à des phases trop avancées du projet. Toutefois, quand il s'agit de technologies très innovantes, ce processus peut également avoir des effets bénéfiques, notamment si les besoins évoluent dans le sens de l'acceptation du produit.

L'ergonomie peut-elle contribuer à analyser ce type de besoins émergents, évolutifs, latents, voire inexistants ? La littérature nous livre diverses positions à cet égard.

Une première position est exposée dans un article de Sinclair, Siemieniuch & Molloy (2006), portant sur la définition des besoins de systèmes dits « immortels ». Il s'agit de systèmes qui seront utilisés pendant une longue période et dont la conception se positionne très en amont de leur utilisation effective (par exemple, des avions civils et militaires, des infrastructures électriques nationales, etc.). Les auteurs suggèrent que les besoins de ce type de systèmes doivent être formulés à un niveau d'abstraction extrêmement élevé, ce qui assurerait une certaine pérennité des besoins définis. Nous considérons que ce raisonnement est transposable et potentiellement utile pour la conception de technologies émergentes, pour lesquelles les besoins des utilisateurs n'existent pas ou existent dans une forme embryonnaire avant l'introduction de la technologie dans plusieurs situations réelles d'utilisation. Évidemment, formuler des besoins d'une manière abstraite assure une position relativement confortable à l'ergonome à un moment donné. Cependant, dans ce cas, la résolution du problème lié à la concrétisation des besoins et à leur transformation en fonctionnalités des futurs dispositifs est déléguée complètement aux concepteurs du système, ce qui engendre un risque, pour l'ergonomie, de n'être perçue que comme une discipline ne fournissant que des réponses générales plutôt vagues.

Une seconde position, suggérée par Lindgaard *et al.* (2006), concerne la réalisation de plusieurs analyses rapides de l'activité (« rapid ethnography », « quick and dirty ethnography ») dans une même situation de travail, d'une manière itérative. De telles analyses assureraient une compréhension rapide et efficace des difficultés des opérateurs, ainsi qu'une prise en compte de l'évolution de certains de leurs besoins. Cette position nous semble valable uniquement si l'accès fréquent et répété au terrain est assuré et si l'étude est de type longitudinal pour permettre de cerner l'évolution des besoins. Dans le cas contraire, le risque est, bien évidemment, de négliger des aspects importants de l'activité de travail.

Une troisième position proposée dans la littérature est celle de Brangier & Bastien (2006), qui avancent l'idée que, pendant la conception de technologies innovantes, les réponses concernant les besoins « proviennent moins d'une analyse de l'activité que d'une démarche *créative*, où des solutions sont proposées puis testées ergonomiquement ». En ce sens, une piste de réflexion pourrait être l'adoption d'une démarche de conception des technologies émergentes, qui repose sur le prototypage rapide (« rapid prototyping »). Une telle démarche pourrait faciliter l'intégration des utilisateurs tôt dans le processus en leur

offrant une idée concrète de la technologie. Également, de nouveaux besoins pourraient être générés de cette manière, notamment si les prototypes sont présentés aux utilisateurs dans le cadre de groupes de discussion ou dans d'autres cadres sociaux favorisant la créativité. Enfin, une telle approche pourrait permettre l'intégration de nouveaux besoins émergeant au cours de la conception. Pour l'ergonome, une approche de la conception qui repose sur l'idée du prototypage rapide assurerait, d'une part, un nombre important d'objets d'évaluation, ce qui pourrait favoriser la capitalisation de connaissances sur l'ergonomie des systèmes émergents. D'autre part, une collaboration plus proche avec les concepteurs de technologies émergentes serait ainsi possible. Cette collaboration avec la conception nous paraît importante dans des projets de conception de technologies émergentes, puisque ces dernières sont par définition des technologies de pointe, pour lesquelles les utilisateurs (et une grande partie des ergonomes) ont une expertise technologique insuffisante et, par conséquent, une compréhension de leur fonctionnement et de leurs usages potentiels incomplète.

Une quatrième position exposée dans la littérature sur les technologies traditionnelles, mais qui nous semble particulièrement adaptée à la conception de technologies émergentes, est l'idée de Robertson & Robertson (2004, 2006) selon laquelle le processus d'analyse des besoins pourrait servir de cadre global au processus de développement ergonomique de la technologie. Selon ces auteurs, quand il s'agit de conception de dispositifs innovants, toute intervention ergonomique (analyse de l'activité, modélisation de celle-ci, spécification, prototypage, évaluation, etc.) viendrait alimenter l'analyse des besoins. Un tel processus clairement itératif résulterait en la capitalisation de connaissances ergonomiques sur les besoins des utilisateurs et en la création d'une base de données de besoins utilisables et utiles non seulement dans le cadre d'un projet particulier, mais dans d'autres projets similaires. Nous estimons que ce point est particulièrement important quand il s'agit d'analyser les besoins de technologies émergentes.

En perspective, de nouvelles recherches doivent être réalisées afin d'appuyer cette idée, attirante mais assez abstraite, sur des méthodes d'analyse des besoins « émergents », qui soient suffisamment efficaces et allient étroitement ergonomie et développements technologiques.

Bibliographie

Adcock, M., Hutchins, M., & Gunn, C. (2004). *Haptic collaboration with augmented reality*. Poster presented at *SIGGRAPH 2004*, Los Angeles, USA, Aug.

Aliakseyeu, D., Martens, J.-B., & Rauterberg, M. (2006). A computer support tool for the early stages of architectural design. *Interacting with Computers*, 18, 528-555.

Amiel, A., Tricot, A., & Mariné, C. (2004). Quels facteurs peuvent influencer l'engagement d'un salarié dans une formation à distance ? Étude exploratoire en milieu industriel. *Dossiers de la Recherche en Sciences de l'Éducation*, 12, 65-78.

Anastassova, M. (2002). *Usability evaluation of the Ambient Agoras information and communication system*. Rapport de stage de DESS, Université Paris 5.

Anastassova, M. (2003). *L'activité des mécaniciens et les évolutions de la conception de véhicules : une étude ergonomique exploratoire d'une assistance par la réalité augmentée*. Mémoire de DEA, CNAM.

Anastassova, M. (2005a). *La réalité augmentée pour la formation à la maintenance automobile : spécification des besoins utilisateurs*. Rapport LIST/DTSI/SCRI/LCI/05RT.021, Fontenay-aux-Roses : CEA.

Anastassova, M. (2005b). *La réalité augmentée pour la formation à la maintenance automobile : spécifications fonctionnelles et de l'interface*. Rapport LIST/DTSI/SCRI/LCI/05RT.036, Fontenay-aux-Roses : CEA.

Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Mégard, C., & Ehanno, P. (2005). Results from a user-centred critical incidents study for guiding future implementation of augmented reality in automotive maintenance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, 67-77.

Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Mégard, C., & Leservot, A. (2005). *User-centred design of mixed reality for vehicle maintenance training: an empirical comparison of two techniques for user needs analysis*. Paper presented at *HCII 2005 Human-Computer Interaction International Conference*, Las Vegas, NV, USA, July.

Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Breda, J., & Mégard, C. (2006). *Tests utilisateurs pour l'évaluation d'un prototype de réalité augmentée : résultats et difficultés*. Communication présentée à *ErgoIA 2006*, Biarritz, France, Oct.

Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Mégard, C., & Ehanno, P. (sous presse). L'ergonomie de la réalité augmentée pour l'apprentissage : une revue. *Le Travail Humain*.

Azuma, R.T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6, 355–385.

Azuma, R.T., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21, 34–47.

Baber, C. (2001). Wearable computers: a human factors review. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 13, 123–145.

Baber, C., Arvantis, T., Haniff, D., & Buckley, R. (1999). *A wearable computer for paramedics: initial design studies*. In M.A. Sasse & C. Johnson (Eds.), *Interact'99* (pp. 126-132). Amsterdam: IOS Press.

Baber, C., & Baumann, K. (2002). Embedded human computer interaction. *Applied Ergonomics*, 33, 273–287.

Baber, C., Haniff, D.J., Knight, J., Cooper, L., & Mellor, B.A., (1998). Preliminary investigations into the use of wearable computers. In R. Winder (Ed.), *People and Computers XIII* (pp. 313-326). London: Springer.

Baber, C., Knight, J., Haniff, D., & Cooper, L. (1999). Ergonomics of wearable computers. *Mobile Networks and Applications*, 4, 15-21.

Baber, C., & Noyes, J.M. (1996). Automatic speech recognition in adverse environments. *Human Factors*, 3, 142-155.

Bach, C. (2004). *Élaboration et validation de critères ergonomiques pour les interactions Homme - Environnements Virtuels*. Thèse, Université de Metz.

Bajura, M., Fuchs, H., & Ohbuchi, R. (1992). Merging virtual reality with the real world: seeing ultrasound imagery within the patient. *Computer & Graphics*, 26, 203 – 210.

Balaguer, A., Lours, J., Junyent, E., & Ferr, G. (2001). *Scenario based design of augmented reality systems applied to cultural heritag*. Paper presented at the *Panhellenic Conference on Human Computer Interaction*, Patras, Greece, Dec.

Barab, S.A., Hay, K.E. and Yamagata-Lynch, L.C. (2001). Constructing networks of action relevant episodes: an in-situ research methodology. *The Journal of the Learning Sciences*, 10, 63-112.

Barab, S. A., & Duffy, T. M. (2000). From Practice Fields to Communities of Practice. In D. H. Jonassen & S. M. Land (Eds.) *Theoretical Foundations of Learning*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

Barab, S.A., MaKinster, J.G., & Scheckler, R. (2003). Designing system dualities: characterizing a web-supported teacher professional development community. *Information Society*, 19, 237-256.

Barkai, J. (2001). *Vehicle diagnostics – are you ready for the challenge ?* Rapport 01ATT – 208. Washington : Society of Automotive Engineers, Inc.

(www.diagnosticstrategies.com/papers/01ATT208.pdf)

Barki, H., & Hartwick, J. (1991). *User participation and user involvement in information system development*. Proceedings of the 24th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 1991, Vol. IV, 487 – 492.

Baroudi, J.J., Olson, M.H., & Ives, B. (1986). An empirical study of the impact of user involvement on system usage and information satisfaction. *Communications of the ACM (Ass. for Computing and Machinery)*, 29, 232 – 238.

Barrett, J. R., Strayer, S. M., & Schubart, J. R. (2004). Assessing medical residents' usage and perceived needs for personal digital assistants. *International Journal of Medical Informatics*, 73, 25-34.

Bastien, J.M.C., & Scapin, D. (2004). La conception de logiciels interactifs centrée sur l'utilisateur : étapes et méthodes. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie*, Paris : PUF.

Belcher, D., Billingham, M., Hayes, S., & Stiles, R. (2003). *Using Augmented Reality for Visualizing Complex Graphs in Three Dimensions*. Paper presented at 2nd IEEE/ACM ISMAR 2003 (*International Symposium on Mixed and Augmented Reality*), Tokyo, Japan, Oct.

- Benko, H., Ishak, E.W., & Feiner, S. (2004). *Collaborative mixed reality visualization of an archaeological excavation*. Paper presented at the 3rd IEEE/ACM ISMAR 2004 (International Symposium on Mixed and Augmented Reality). Arlington, VA, USA, Nov.
- Berg, S., Taylor, A.S., & Harper, R. (2003). *Mobile phones for the next generation: device designs for teenagers*. Paper presented at the CHI 2003, Ft. Lauderdale, FL, USA, April.
- Bertrand, L., & Weill-Fassina, A. (1993). Formes de représentations fonctionnelles et contrôles des actions dans le diagnostic de panne. In A. Weill-Fassina, P. Rabardel, & D. Dubois, *Représentations pour l'action* (pp. 247–270). Toulouse : Octarès.
- Billinghurst, M., Belcher, B., Gupta, A., & Kiyokawa, K. (2003). Communication behaviors in collaborative AR interfaces. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 16, 395-423.
- Bimber, O. & Raskar, R. (2006). Spatial Augmented Reality. *SIGGRAPH 2006 Course*. (<http://www.SpatialAR.com>)
- Bisseret, A., Sébillotte, S., & Falzon, P. (Eds.) (1999). *Techniques pratiques pour l'étude des activités expertes*. Toulouse : Octarès.
- Bodker, S., & Gronbaek, K. (1991). Cooperative prototyping: users and designers in mutual activity. *Journal of Man-Machine Studies*, 34, 433-478.
- Bonanni, L., Lee, C.H., & Selker, T. (2005). *Attention-Based Design of Augmented Reality Interfaces*. Short paper in the *Extended Abstracts of Computer Human Interaction (CHI) 2005*, Portland, OR, USA, April.
- Bonnet, M. (1975). Utilisation de la simulation pour l'apprentissage de la localisation des pannes. *Bulletin du C.E.R.P.*, 23, 81 – 116.
- Borst, C. W., & Volz, R. A. (2005). Evaluation of a Haptic Mixed Reality System for Interactions with a Virtual Control Panel. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14, 677 – 696.
- Boud, A. C., Haniff, D.J., Baber, C., & Steiner, S.J. (1999). *Virtual reality and augmented reality as a training tool for assembly tasks*. Paper presented at IV'99 International Conference on Information Visualization, London, England, July.

- Bowers, J., & Pycock, J. (1994). *Talking through design: requirements and resistance in cooperative prototyping*. Paper presented at CHI94, Boston, MA, USA, April.
- Bowman, D., Gabbard, J., & Hix, D. (2002). A survey of usability evaluation in virtual environments: classification and comparison of methods. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11, 404-424.
- Brangier, E., & Barcenilla, J. (2003). *Concevoir un produit facile à utiliser*. Paris : Éditions d'Organisation.
- Brangier, E., & Bastien, J.M.C. (2006). L'analyse de l'activité est-elle suffisante et/ou pertinente pour innover dans le domaine des nouvelles technologies ? In G. Valléry & R. Amalberti (Eds.), *L'analyse du travail en perspectives. Influences et évolutions*. Toulouse : Octarès.
- Breda, J. (2005). *Évaluation d'un prototype d'aide à la maintenance en réalité augmentée par des tests utilisateurs*. Mémoire de Master 1^{ère} année, Université Paris 5.
- Bristow, H. W., Baber, C., Cross, J., & Wooley, S., (2002), *Evaluating contextual information for wearable computing*. Paper presented at *The Sixth International Symposium on Wearable Computers*, pp. 175-186.
- Brooks, F. P. Jr. (1996). The Computer Scientist as Toolsmith II. *Communications of the ACM (Ass. for Computing Machinery)*, 39, 61-68.
- Brown, D., Baillot, Y., Julier, S., Maassel, P., Armoza, D., Livingston, M., & Rosenblum, L. (2004). *Building a mobile augmented reality system for embedded training : lessons learned*, Presented at *I/ITSEC'04 Interservice / Industry Training, Simulation, & Education Conference*, Orlando, USA, Decembre.
- Brown, D.G., Stripling, R., & Coyne, J.T. (2006). *Augmented Reality for Urban Skills Training*. Paper presented at *IEEE Virtual Reality 2006 Conference*, Alexandria, VA, March.
- Bruseberg, A., & McDonagh-Philp, D. (2001). New product development by eliciting user experience and aspirations. *International Journal of Human – Computer Studies*, 55, 435-452.
- Bruseberg, A., & McDonagh-Philp, D. (2002). Focus groups to support the industrial/product designer: a review based on current literature and designers' feedback. *Applied Ergonomics*, 33, 27-38.

- Burkhardt, J.-M. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le Travail Humain*, 66, 65-91.
- Burkhardt, J.-M. (2006). Ergonomie, facteurs humains et réalité virtuelle. In P. Fuchs, G. Moreau, A. Berthoz, & J.-L. Vercher (Eds.) *Le traité de la réalité virtuelle* (pp. 117-150). Paris : Presses de l'École des Mines.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Mellet d'Huart, D. (2003). La conception des environnements virtuels pour l'apprentissage. In Ph. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le traité de réalité virtuelle* (pp. 207-296). Paris : Les Presses de l'École des Mines de Paris.
- Burkhardt, J.-M., & Sperandio, J.-C. (2004). Ergonomie et conception informatique. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 437-450). Paris : Presses Universitaires de France.
- Burkhardt, J.-M., & Wolff, M. (2002). *Réalité virtuelle et nouvelles technologies en formation : vers une formalisation des critères de choix et de la démarche centrée sur l'apprentissage*. Rapport du contrat SNCF-DER/LEI). Paris : Université Paris 5.
- Carroll, J.M. (1995). *Scenario-Based Design: Envisioning Work and Technology in System Development*. John Wiley & Sons.
- Carroll, J.M. (2000). *Making Use: Scenarios and Scenario-Based Design of Human-Computer Interactions*. Cambridge, MA : The MIT Press.
- Caudell, T., & Mizell, D. (1992). Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences*, 2, 659-669.
- Chabaud, C., Lasserre, L., Soubie, J.-L., Sperandio, J.-C., & De Terssac, G. (1990). *Étude d'impact et approche méthodologique de la validation des systèmes à base de connaissances*. Rapport final d'étude. Paris : IRAP / Université Paris 5.
- Chandler, T. (2000). Keeping current in a changing work environment : design issues in repurposing computer-based training for on-the-job training. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26, 285-299.
- Chatzoglou, P.D., & Macaulay, L.A. (1996). Requirements Capture and Analysis: A Survey of Current Practice. *Requirements Engineering*, 1, 75-87.

- Chung, K.H., Shewchuk, J.P., & Williges, R.C. (1999). An application of augmented reality to dimensional inspection. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 9, 331-342.
- Cohen, M. (1994). *Augmented Audio Reality : design for a spatial sound GPS PGS*. Paper presented at *Virtual Reality Conference*, San Francisco, USA, June.
- Cohen, M., Aoki, S., & Koizumi, N.(1993). *Augmented audio reality: Telepresence/VR hybrid acoustic environments*. Paper presented at *2nd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, Tokyo, Japan, November.
- Cooper, A. (1999). *The Inmates are Running the Asylum*. SAMS, Indianapolis, USA.
- Cooper, R.G. & Kleinschmidt, E.J. (2000). New product performance: what distinguishes the star products. *Australian Journal of Management*, 25, 17-46.
- Cooperstock, J.R. (2001). Classroom of the future: enhancing education through augmented reality. In M. J. Smith, G. Salvendy, D. Harris, & R. J. Koubek (Eds.), *Usability evaluation and interface design: cognitive engineering, intelligent agents and virtual reality* (pp. 688-692). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Damodaran, L. (1996). User involvement in the systems design process : a practical guide for users. *Behaviour & Information Technology*, 15, 363-377.
- Damodaran, L. (2001). Human factors in the digital world enhancing life style – the challenge for emerging technologies. *International Journal of Human – Computer Studies*, 55, 377-403.
- Dangelmaier, W., Fischer, M., Gausemeier, J., Grafe, M., Matysczok, C., & Mueck, B. (2005). Virtual and augmented reality support for discrete manufacturing system simulation. *Computers in Industry*, 56, 371–383.
- Darses, F., & Wolff, M. (2006). How do designers represent to themselves the users' needs? *Applied Ergonomics*, 37, 757-764.
- Davis, A.M., & Zowghi, D. (2006). Good requirements practices are neither necessary nor sufficient. *Requirements Engineering*, 11, 1-3.
- De Terssac, G., & Cabaud, C. (1990). Référentiel opératif commun et fiabilité. In J. Leplat & G. de Terssac (Eds.), *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes* (pp. 111-139). Toulouse : Octarès.

- Diaper, D. (2001). Task analysis for knowledge descriptions (TAKD): a requiem for a method. *Behaviour & Information Technology*, 20, 199-212.
- Drasic, D., & Milgram, P. (1996). Perceptual issues in augmented reality. In S. S. Fisher, M.T. Bolas, & J. O.Merritt (Eds.), *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III* (pp. 123–134). San Jose, CA: SPIE.
- Drucker, P.F. (1998). The discipline of innovation. *Harvard Business Review*, 76, 149 – 157.
- Ehn, P. (1993). Scandinavian design: On participation and skill. In D. Schuler & A. Namioka (Eds.) *Participatory Design: Principles and Practices* (pp. 41-77). Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Ericsson, K.A., & Simon, H. A. (1999). *Protocol analysis: Verbal reports as data*. Cambridge: The MIT Press.
- Fadier, E., & Mazeau, M. (1996). L'activité humaine de maintenance dans les systèmes automatisés : problématique générale. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 30, 1467–1486.
- Fischer, T., Herr, C.M., Burry, M., & Frazer, J. (2003). Tangible interfaces to explain Gaudí's use of ruled-surface geometries. *Automation in Construction*, 12, 467-471.
- Flanagan, J.C. (1954). La technique de l'incident critique. *Revue de Psychologie Appliquée*, 4 (2,3), 165-183 & 267-295.
- Fjeld, M., & Voegtli, B. (2002). *Augmented chemistry : an interactive educational workbench*. Paper presented at the 1st IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2002), Darmstadt, Germany, Sept.
- Flanders N.A. (1970). *Analyzing teaching behaviour*. Addison-Wesley Publishing Co. Reading, Mass.
- Flores, F., & Graves, M. (1988). Computer systems and the design of organizational interaction. *ACM Transactions on Office Information Systems*, 6, 504-513.
- Følstad, A., & Rahlff, O.-W. (2005). *Challenges in Conducting User-Centered Evaluations of Mobile Services*. Paper presented at HCII 2005 Human-Computer Interaction International Conference, Las Vegas, NV, USA, July.

Foster Jr, S. T. & Franz, C. R. (1999). User involvement during information systems development : a comparison of analyst and user perceptions of system acceptance. *Journal of Engineering and Technology Management*, 16, 329 – 348.

Fuchs, Ph., Moreau, G., & Papin, J.-P. (2001). *Le traité de la réalité virtuelle*. Paris : Les Presses de L'École des Mines de Paris.

Fuchs, Ph., & Moreau, G. (Eds.). (2003). *Le traité de la réalité virtuelle*. Paris : Les Presses de L'École des Mines de Paris.

Gabbard, J. L., & Hix, D. (2001). Researching usability design and evaluation guidelines for Augmented Reality Systems.

(www.sv.vt.edu/classes/ESM4714/Student_Proj/class00/gabbard/).

Gabbard, J.L., Swan II, J.E., Hix, D., Lanzagorta, M., Livingston, M., Brown, D., & Julier, S. (2002). Usability Engineering: Domain Analysis Activities for Augmented Reality Systems, In A. Woods, J. Merritt, S. Benton, & M. Bolas, (Eds.), *The Engineering Reality of Virtual Reality 2002* (pp. 445-457), SPIE Volume 4660, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IX.

Gabbard, J.L., Swan, J.E., II, Hix, D., Schulman, R.S., Lucas, J., & Gupta, D. (2005). *An empirical user-based study of text drawing styles and outdoor background textures for augmented reality*. Paper presented at the *IEEE Virtual Reality Conference 2005*, Bonn, Germany, March.

Gaggioli A., Morganti, F., Meneghini, A., Alcaniz, M., Lozano, J.A., Montesa, J., Martínez, J.M., Walker, R., Lorusso, I., & Riva, G. (2005). The virtual mirror : mental practice with augmented reality for post-stroke rehabilitation. *CyberPsychology & Behavior*, 8, 300 – 370.

Geelhoed, E., Falahee, M., & Latham, K. (2000). Safety and comfort of eyeglasses displays. In P. J. Thomas & H.-W. Gellersen (Eds.), *Handheld and ubiquitous computing* (pp.236-247). Bristol, UK: Springer.

Goldiez, B., Livingston, M.A., Dawson, J., Brown, D., Hancock, P., Baillot, Y., & Julier, S.J. (2004). *Advancing human-centered augmented reality research*. Paper presented at the *2004 Army Science Conference*, Orlando, FL, USA, Nov.

- Gould, J.D. (1987). *How to design usable systems*. Proceedings of the *Second IFIP Conference on Human-Computer Interaction INTERACT '87*, Elsevier Science Publishers, North-Holland.
- Grundin, J. (1991). Systematic sources of suboptimal interface design in large product development organizations. *Human Computer Interaction*, 6, 147 - 196.
- Grusenmeyer, C. (2002). Interactions maintenance – exploitation et sécurité. Étude exploratoire. *Cahiers de notes documentaires de l'INRS, Hygiène et sécurité du travail*, 186, 53-66.
- Guillemet, A. (2005). *Modèle d'architecture logicielle pour la réalité augmentée*. Mémoire de Master 2^{ème} année, Université Technologique de Compiègne.
- Gulliksen, J., Boivie, I., & Göransson, B. (2006). Usability professionals - current practices and future development. *Interacting with Computers*, 18, 568-600.
- Hall, R. (2001). Prototyping for usability of new technology. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55, 485 – 501
- Haniff, D.J., & Baber, C. (2003). User evaluation of augmented reality systems. In E. Banissi, K. Börner, C. Chen, G. Clapworthy, C. Maple, A. Lobben, C.J. Moore, J.C. Roberts, A. Ursyn, & J. Zhang (Eds.), *7th international conference on information visualization* (pp. 505-511), London, UK: IEEE Computer Society.
- Hix, D., Joseph L. Gabbard, J. Edward Swan II, Mark A. Livingston, Tobias H. Höllerer, Simon J. Julier, Yohan Baillot, and Dennis Brown, *A Cost-Effective Usability Evaluation Progression for Novel Interactive Systems*, Paper presented at *Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-37)*, Hawaii, USA, Jan.
- Heinbokel, T., Sonnentag, S., Frese, M., Stolte, W., & Brodbeck, F.C. (1996). Don't underestimate the problems of user centeredness in software development projects – there are many! *Behaviour & Information Technology*, 15, 226 -236.
- Höllerer, T., Feiner, S., Terauchi, T., Rashid, G., & Hallaway, D. (1999). Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System. *Computers & Graphics*, 23, 779-785.

- Ishii, H., & Ullmer, B. (1997). *Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms*. Paper presented at the *ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (ACM CHI '97)*, Atlanta, USA, April.
- Isomursu, M., Kuutti, K. and Väinämö, S. (2004). *Experience Clip : Method for User Participation and Evaluation of Mobile Concepts*. Paper presented at the *ACM Participatory Design Conference PDC 2004*, Toronto, Canada, July.
- Jones, M.J., Minogue, J., Tretter, T.R., Negishi, A., & Taylor, R. (2006). Haptic augmentation of science instruction: Does touch matter? *Science Education*, 90, 111 – 123.
- Kalawsky, R. (1993). *The science of virtual reality and virtual environments*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Kaufmann, H., & Schmalstieg, D. (2003). Mathematics and geometry education with collaborative augmented reality. *Computers & Graphics*, 27, 339-345.
- Kaufmann, H., Steinbügl, K., Dünser, A., & Glück, J. (2005). General training of spatial abilities by geometry education in augmented reality. *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine: A Decade of VR*, 3, 65-76.
- Kaulio, M.A. & Karlsson, I.C.M. (1998). Triangulation strategies in user requirements investigations: a cas study on the development of an IT-mediated service. *Behaviour & Information Technology*, 17, 103-112.
- Kelkar, Khasawneh, Bowling, Gramopadhye, Melloy, & Grimes (2005). The added usefulness of process measures over performance measures in interface design. *Intern. Journ. Human Computer Interaction*, 18, 1-18.
- Kim, H., Yoon, W., & Choi, S. (1999). Aiding fault diagnosis under symptom masking in dynamic systems, *Ergonomics*, 42, 1472–1481.
- Kirkley, S., Kirkley, J., Borland, C., Waite, T., Dumanoir, P., Garrity, P., & Witmer, B. (2002). *Embedded training with mobile augmented reality*. Paper presented at the *23rd Army Science Conference*. Orlando, USA, Dec.
- Kjeldskov, J. (2003). *Human-computer interaction design for emerging technologies : virtual reality, augmented reality and mobile computer systems*. Thèse, Aalborg University, Aalborg.

- Kjeldskov, J. & Graham, C. (2003). *A Review of Mobile HCI Research Methods*. In Lecture Notes in Computer Science: Human-Computer Interaction with Mobile Devices. *5th International Symposium, Mobile HCI 2003* (pp.317-335). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Konishi, K., Hashizume, M., Nakamoto, M., Kakeji, Y., Yoshino, I., Taketomi, A., Sato, Y., Tamura, S., & Maehara, Y. (2005). Augmented reality navigation system for endoscopic surgery based on three-dimensional ultrasound and computer tomography: Application to 20 clinical cases. *International Congress Series 1281*, 537-542.
- Kujala, S. (2003). User involvement : a review of the benefits and challenges. *Behaviour & Information Technology*, 22, 1-16.
- Kustaborder, J., & Sharma, R. (1999). *Experimental evaluation of augmented reality for assembly training*. Paper presented at the 2nd IEEE/ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR'99), San Francisco, USA, Oct.
- Lahy, J.-M., & Pacaud, S. (1948). Étude d'un métier. Mécaniciens et chauffeurs de locomotives. Paris, PUF.
- Lai, W.Y. & Duh, H.B.L. (2004). Dynamic 3-D information visualization for quantitative information in augmented reality systems. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry (ACM VRCAI 2004)*, Singapore, 148-151.
- Lave, J., & Wenger, E. (1991). *Situated learning: legitimate peripheral participation*, New York: Cambridge University press.
- Lawson, S., & Nutter, D. (2005). Multimodal augmented reality to assist ageing-in-place. Poster. (http://www.sparc.ac.uk/awards_projects_more_information.asp.)
- Leonard, D. & Rayport, J.F. (1997). Spark innovation through empathic design. *Harvard Business Review*, 6, 102 – 113.
- Leplat, J. (1991). Activités collectives et nouvelles technologies. *Revue Internationale de Psychologie Sociale*, 4, 335-356.

Leplat, J. (2006). 15 ans d'analyse de l'activité : quelles évolutions ? In G. Valléry & R. Amalberti (Eds.), *L'analyse du travail en perspectives. Influences et évolutions*. Toulouse : Octarès.

Leplat, J., & Savoyant, A. (1972). Entretien et fiabilité. In *Fiabilité et Sécurité. Éléments pour une ergonomie des systèmes en milieu industriel*, 7, 139–194.

Liarokapis, F., Mourkoussis, N., Petridis, Rumsey, S., Lister, P.F., & White, M. (2002). *An interactive augmented reality system for engineering education*. Paper presented at the 3rd Global Congress on Engineering Education. Melbourne, Australia, July.

Lindgaard, G., Dillon, R., Trbovich, P., White, R., Fernandes, G., Lundahl, S., & Pinnamaneni, A. (2006). User Needs Analysis and requirements engineering: Theory and practice. *Interacting with computers*, 18, 47-70.

Livingston, M.A., Brown, D., Julier, S.J., & Schmidt, G.S. (2006). *Mobile Augmented Reality: applications and human factors evaluations*. Paper presented at the NATO Human Factors and Medicine Panel Workshop on Virtual Media for Military Applications, West Point, NY, USA, June.

Livingston, M.A., Swan II, J.E., Gabbard, J.L., Höllerer, T.H., Hix, D., Julier, S.J., Baillot, Y., & Brown, D. (2003). *Resolving Multiple Occluded Layers in Augmented Reality*. Paper presented at the 2nd International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Tokyo, Japan, Oct.

Lombard, M., & Ditton, T. (1997). *At the heart of it all: the concept of telepresence*. JCMC. (<http://jcmc.huji.ac.il>)

Long, D. (1986). Human factors considerations for maintenance and repair of off-road haulage trucks. In W. Karwowski (Ed.), *Trends in Ergonomics / Human Factors III*. Proceedings of the Annual International industrial Ergonomics and Safety Conference (465–473). Louisville, Kentucky : North-Holland, Amsterdam.

Luo, X., Kenyon, R. V., & Kamper, D. G. (2006). *VR post-stroke hand opening rehabilitation: an approach utilizing virtual reality, body orthosis and pneumatic device*. Paper presented at 2006 International Conference on Aging, Disability and Independence, St. Petersburg, Florida, Feb.

- Mackay, W.E. (2000). Is paper safer? The role of paper flight strips in air traffic control. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 6, 311-340.
- Maguire, M., & Bevan, N. (2002). *User requirements analysis : a review of supporting methods*. Paper presented at *IFIP 17th World Computer Congress*, Montreal, Canada, Aug.
- Mars, F., Vercher, J.-L., & Blouin, J. (2004). Perception of the vertical with a head-mounter visual frame during head tilt. *Ergonomics*, 47, 1116-1130.
- Mars, F., Bringoux, L., Cian, C., Barraud, P.A., Raphel, C., & Vercher, J.-L. (2005). Perception de la verticale avec un cadre visuel solidaire de la tête : implications pour l'utilisation des visiocasques. *Le Travail Humain*, 68, 125-153.
- Massó, J.P.M., & López, P.G. (2004). *Model-Based Design and New User Interfaces: Current Practices and Opportunities*. Paper presented at *MBUI 2004, Making model-based user interface design practical: usable and open methods and tools*. Madeira, Portugal, Jan.
- Mayes, J.T., & Fowler, C.J.H. (1999). Learning technology and usability: a framework for understanding courseware. *Interacting with Computers*, 11, 485-497.
- Mayhew, D. J. (1999). *The usability engineering lifecycle: A practitioner's handbook for user interface design*. San Francisco, California: Morgan Kaufmann Publishers.
- McDonald, C. (2003). *Hand interaction in augmented reality*. Master Thesis, Carleton University, Ottawa.
- Mestre, D.R. (2004). Activités sensori-motrices : apports de la réalité virtuelle à la psychologie ergonomique. In J.-M. Hoc & F.Darses (Eds.), *Psychologie ergonomique : tendances actuelles* (pp. 201 – 220). Paris : Presses Universitaires de France.
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E77-D, 1321-1329.
- Mischkowski, R.A., Zinser, M., Kübler, A., Seifert, U., & Zöller, J.E. (2005). Clinical and experimental evaluation of an augmented reality system in cranio-maxillofacial surgery. *International Congress Series 1281*, 565-570.
- Mulholland, P., Ivergard, T. & Kirk, S. (2005). Introduction: contemporary perspectives on learning for work. *Applied Ergonomics*, 36, 125–126.

- Muller, M.J. (2002). Participatory design: the third space in HCI. In Jacko, J.A., and Sears, A. (Eds.) *The Human-Computer Interaction Handbook*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, 2002.
- Muller, M.J., Haslwanter, J.H., & Dayton, T. (1997). Participatory Practices in the Software Lifecycle. In M. Helander, T.K. Landauer & P. Prabhu (Eds), *Handbook of Human Computer Interaction*, 255-297. Amsterdam: Elsevier Science B.V.
- Mynatt, E.D., Back, M., Want, R., & Frederick, R. (1997). *Audio Aura: Light-Weight Audio Augmented Reality*. Paper presented at *ACM User Interface Software and Technology*, Alberta, Canada, Oct.
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. London: Academic Press.
- Nielsen, J. Why You Only Need to Test with Five Users, 2000. (<http://www.useit.com/papers/uselabs.html>)
- Neumann, U., & Majoros, A. (1998). *Cognitive, performance, and systems issues for augmented reality applications in manufacturing and maintenance*. Paper presented at the *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'98)*, Atlanta, GA, USA, March.
- Ockerman, J.J., & Pritchett, A.R. (1998). Preliminary investigation of wearable computers for task guidance in aircraft inspection. In Digest of papers of the 2nd *International Symposium on Wearable Computers* (pp. 33-40). Los Almitos, CA: IEEE Computer Society.
- Olphert, C.W., & Harker, S.D. (1994). The ORDIT method for organisational requirements definition. In G.E. Bradley & H.W. Hendrick (Eds.), *Human factors in organizational design and management – IV* (pp. 421-426). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Patrick, J., James, N., & Friend, C. (1996). A field study of training fault-finding. *Le Travail Humain*, 59, 23–45.
- Price, S., Rogers, Y., Scaife, M., Stanton, D. & Neale, H. (2003) Using ‘tangibles’ to promote novel forms of playful learning. *Interacting with Computers*, 15, 169-185.
- Rabardel, P. (2005). Instrument subjectif et développement du pouvoir d’agir. In P. Rabardel & P. Pastré (Eds.), *Modèles du sujet pour la conception*. Toulouse : Octarès.

- Reich, R. (1986). Exposure to noise of maintenance personnel of tractive units in railway repair and servicing shops of the Deutsche Reichsbahn. *Verkehrsmedizin und Ihre Grenzgebiete*, 33, 1–10.
- Reising, D. (1993). *Diagnosing Multiple Simultaneous Faults*. Paper presented at *The 37th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, Seattle, WA, USA.
- Reising, D. & Sanderson, P. (1995). *Mapping the domain of electronic repair shops : a field study in fault diagnosis*. Paper presented at the *39th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, San Diego, CA, USA, Oct.
- Reitmayr, G. & Schmalstieg, D. (2004). *Collaborative Augmented Reality for Outdoor Navigation and Information Browsing*. Paper presented at the *Symposium Location Based Services and TeleCartography*, Vienna, Austria, Jan.
- Rexfelt, O., & Rosenblad, E. (2006). The progress of user requirements through a software development project. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36, 73-81.
- Roberts J. (2002) Is there a Next Big Thing? The Information Age. (<http://www2.idg.com.au/infage1.nsf/all/F5A4077159B9DF5ACA256B9C0019517B?OpenDocument>)
- Robertson, S. (2001). Requirements trawling : techniques for discovering requirements. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55, 405-421.
- Robertson, S. & Roberston, J. (2004). *Requirements-led project management: discovering David's slingshot*, Addison-Wesley Professional.
- Robertson, S. & Roberston, J. (2006). *Mastering the requirements process*, Addison-Wesley & ACM Press.
- Rönkkö, J., Markkanen, J., Launonen, R., Ferrino, M., Gaia, E., Basso, V., Patel, H., D'Cruz, M., & Laukkanen, S. (2006). Multimodal astronaut virtual training prototype. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64, 182-191.
- Rosenthal, M., State, A., Lee, J., Hirota, G., Ackerman, J., Keller, K., Pisano, E.D., Jiroutek, M., Muller, K., & Fuchs, H. (2002). Augmented Reality Guidance for Needle Biopsies: An Initial Randomized, Controlled Trial in Phantoms. *Medical Image Analysis*, 6, 313-320.

- Roth, W.-M. (1996). Knowledge diffusion in a grade 4-5 classroom during a unit of civil engineering: An analysis of a classroom community in terms of its changing resources and practices. *Cognition and Instruction*, 14, 170 – 220.
- Rowley, D.E. (1996). Organisational considerations in field-oriented product development: experiences of a cross-functional team. In D. Wixon & J. Ramey (Eds.), *Field methods casebook for software design*, (pp. 17-34). New York, NJ: Wiley.
- Saint-Venant, M., Closset, J.-C., Cottaz, B., Dubois, F., Faurie, A., & Fériol, F. (2002). *Repères pour la formation Baccalauréat Professionnel "Maintenance des véhicules automobiles"*. Ministère de la jeunesse, de l'éducation nationale et de la recherche. (www.educauto.org/Documents/Officielle/Repere%20Formation%20BacPro%20MVA.pdf)
- Scarlato, L.L. (2002). TICLE: using multimedia multimodal guidance to enhance learning. *Information Sciences*, 140, 85-103.
- Scholtz, J. (2006). Metrics for evaluating human information interaction systems. *Interacting with Computers*, 18, 507 – 527.
- Schraagen, J.M.C. & Schaafstal, A.M. (1996). Training of systematic diagnosis : a case study in electronics troubleshooting. *Le Travail Humain*, 59, 5–23.
- Schwald, B., & De Laval, B. (2003). *An augmented reality system for training and assistance to maintenance in the industrial context*. Paper presented at 11th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG'03). Plzen – Bory, Czech Republic, Feb.
- Service Tech Magazine (2001). Training : the technicians viewpoint and a call to action. *Service Tech Magazine*, Novembre 2001. (<http://www.sts.sae.org/servicetech/nov-2001/>)
- Shelton, B., & Hedley, N. (2002). *Using augmented reality for teaching earth-sun relationships to undergraduate geography students*. Paper presented at the 1st IEEE International Augmented Reality Toolkit Workshop. Darmstadt, Germany, Sept.
- Sinclair, M.A., Siemieniuch, C.E., & Molloy, E. (2006). *The ergonomics issues of "Immortal Systems"*. Paper presented at the International Ergonomics Association 16th Congress, Maastricht, The Netherlands, July.

- Slay, H., Phillips, M., Vernik, R., & Thomas, B. (2001). *Interaction modes for augmented reality visualization*. Paper presented at the *Australian Symposium on Information Visualization*, Sydney, Australia, Dec.
- Smith, A., & Dunckley, L. (2002). Prototype evaluation and redesign: structuring the design space through contextual techniques. *Interacting with Computers*, 14, 821-843.
- Soler, L., Nicolau, S., Schmid, J., Koehl, C., Marescaux, J., Pennec, X., & Ayache, N. (2004). *Virtual reality and augmented reality in digestive surgery*. Paper presented at *ISMAR 2004 3rd IEEE and ACM International Symposium*, Arlington, VA, USA, Nov.
- Sperandio, J.-C. (1980). *La psychologie en ergonomie*. Paris : PUF.
- Sperandio, J.-C. (2001). *Critères ergonomiques de l'assistance technologiques aux opérateurs*. Communication présentée à *JIM'2001 : Interaction Homme – Machine & Assistance*, Metz, France, Juillet.
- Sperandio, J.-C. (2003). Modèles et formalismes, ou le fond et la forme. In J.C. Sperandio & M. Wolff (Eds.), *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie*. Paris : PUF.
- Stary, C. (2002). Shifting knowledge from analysis to design: requirements for contextual user interface development. *Behaviour & Information Technology*, 2, 425 – 440.
- Stedmon, A.W., Hill, K., Kalawsky, R.S., & Cook, C.A. (1999a). *Old theories, new technologies: comprehension and retention issues in augmented reality systems*. Paper presented at *The 43rd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society (HFES'99)*, Santa Monica, USA, Human Factors & Ergonomics Society.
- Stedmon, A.W., Hill, K., Kalawsky, R.S., & Cook, C.A. (1999b). *Old theories, new technologies: cumulative clutter effects using augmented reality*. Presented at *The IEEE International Conference on Information Visualisation*, London, New York: IEEE Computer Society.
- Stedmon, A.W., & Stone, R. (2001). Re-viewing reality: human factors issues in synthetic training environments. *International Journal of Human Computer Studies*, 55, 675–698.
- Sutcliffe, A. (2002). *User-centred requirements engineering*. Springer-Verlag.

- Swan II, J.E., & Gabbard, J.L. (2005). *Survey of user-based experimentation of augmented reality*. Paper presented at *HCII 2005 Human-Computer Interaction International Conference*, Las Vegas, NV, USA, July.
- Swan II, J.E., Livingston, M.A., Smallman, H.S., Brown, D., Baillot, Y., Gabbard, J.L., & Hix, D. (2006). *A perceptual matching technique for depth judgements in optical, see-through augmented reality*. Paper presented at *IEEE Virtual Reality 2006*, Alexandria, Virginia, USA, March.
- Tang, A., Owen, C., Biocca, F., & Mou, W. (2003). *Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly*. Paper presented at the *ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (ACM CHI '03)*, 73-80.
- Technology Review (2004). *10 Emerging Technologies That Will Change Your World*. MIT (http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?id=13438&ch=infotech)
- Terrenghi, L., Kronen, M., Valle, C.: *Usability Requirement for Mobile Service Scenarios*, Paper presented at *HCI International Conference*, Las Vegas, USA, July 2005
- Tison, C., Scapin, D. L., & Carbonell. N. (2003). *Techniques et modalités d'interaction Homme-Machine avec des environnements et des représentations d'objets 3D : revues de questions*. Rapport du contrat COMEDIA. Le Chesnay, France: INRIA.
- Tönnis, M., Sandor, C., Lange, C., & Bubb, H. (2005). *Experimental Evaluation of an Augmented Reality Visualization for Directing a Car Driver's Attention*. Paper presented at *ISMAR 2005*, Berlin, Germany, June.
- Träskbäck, M., & Haller, M. (2004). *Mixed Reality Training Application for an Oil Refinery : User Requirements. Virtual Reality Continuum and its applications in Industry*. Paper presented at *VRCAI 04*, Singapore, June.
- Träskbäck, M., & Nieminen, M.P. (2003). *Requirements for Using Mixed Reality in Museums*. Paper presented at *AVIR2003 (Augmented Virtual Reality Workshop)*, Geneva, Switzerland, Sept.
- Trevisan, D., Vanderdonck, J., & Macq, B. (2003). *Model-based Approach and Augmented Reality Systems*. Paper presented at *HCII 2003*, Heraklion, Greece, June.

- Uzan, G. (1985). La qualification du dépanneur dans les biens électro-domestiques. *Formation et Emploi*, 10, 42-52.
- Van der Veer, G.C., & Van Welie, M. (1999). *Groupware Task Analysis*, Tutorial Notes for the *CHI99 workshop "Task Analysis Meets Prototyping: Towards seamless UI Development"*, May, Pittsburgh PA, USA.
- Van Schaik, P. (1999). Involving users in the specification of functionality using scenarios and model-based evaluation. *Behaviour & Information Technology*, 18, 455–466.
- Virokannas, H., Anttonen, H., & Niskanen, J. (1994). Health risk assessment of noise, hand-arm vibration and cold in railway track maintenance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 13, 247–252.
- Vredenburg, C., Isensee, S., & Righi, C. (2002). *User-centered design: An integrated approach*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Wacker, F.C., Vogt, S., Khamene, A., Sauer, F., Wendt, M., Duerk, J.L., Lewin, J.S., & Wolf, K.-J. (2005). MR image-guided needle biopsies with a combination of augmented reality and MRI: A pilot study in phantoms and animals. *International Congress Series 1281*, 424-428.
- Wagner, D., Pintaric, T., Ledermann, F., & Schmalstieg, D. (2005). *Towards Massively Multi-User Augmented Reality on Handheld Devices*. Paper presented at *The Third International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2005)*, Munich, Germany, May.
- Wagner, D. & Schmalstieg, D. (2006). *Handheld Augmented Reality Displays*. Paper presented at the *IEEE Virtual Reality 2006*, Alexandria, VA, USA, March.
- Ward, S. (1994). Getting feedback from users early in the design process: a case study. In N. Adams, N. Coleman & M. Stevenson (Eds). *Ergonomics: the Fundamental Design Science, Proceedings of the 30th Annual Conference of the Ergonomics Society of Australia* (pp. 22-29). Canberra: The Ergonomics Society of Australia.
- Ward, K., & Novick, D. (2003). *Hands-free documentation*. Paper presented at the *21st Annual International Conference on Documentation (SIGDOC 2003)*, San Francisco, CA, USA, Oct.

- Weidenbach, M., Wick, C., Pieper, S., Quast, K.J., Fox, T., Grunst, G., & Redel, D.A. (2000). Augmented reality simulator for training in two-dimensional echocardiography. *Computers and Biomedical Research*, 33, 11-22.
- Weill-Fassina, A., Filleur, C., & Poulier, M.-H. (1989). Représentations et fonctionnements cognitifs dans une recherche de panne d'un système d'allumage en mécanique-auto. *Journal Européen de Psychologie de L'éducation*, 4, 83-102.
- Wiedenmaier, S., Oehme, O., Schmidt, L., & Luczak, H. (2003). Augmented reality for assembly processes – design and experimental evaluation. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 16, 497-514.
- Wilson, A., Bekker, M., Johnson, H., & Johnson, P. (1996). *Costs and benefits of user involvement in design: Practitioners' views*. Proceedings of HCI'96, *People and Computers XI* (London: Springer Verlag), pp. 221-240.
- Wilson, J. R., Eastgate, R.M., and D'Cruz, M. 2002. Structured Development of Virtual Environments. In K.M. Stanney (Ed.) *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 353-378). Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates..
- Wilson, J. R. & D'Cruz, M. 2006. Virtual and interactive environments for work of the future. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64, 158–169.
- Wolff, M. (2003). Apports de l'analyse géométrique des données pour l'analyse de l'activité. In J.C. Sperandio & M. Wolff (Eds.), *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie* (pp. 195- 227). Paris : PUF.
- Wolff, M., & Sperandio, J.-C. (2000). Analyse mutidimensionnelle d'entretiens individuels pour l'étude d'un retour d'expérience. In B. Mélier & Y. Quéinnec (Eds.), *Communication et travail* (pp. 2-8). Toulouse : Octarès.
- Woolrych, A., & Cockton, G. (2002). *Why and When Five Test Users aren't enough*. In *Proceedings of IHM-HCI 2001 Conference: Volume 2*, J. Vanderdonckt, A. Blandford, and A. Derycke (Eds.), Toulouse : Cépadues Éditions, 105-108.
- Wragg, E.C. (1999). *An introduction to classroom observation*, 2nd edition. London : Routledge.

Wyeth P. & Wyeth G.F. (2001) Electronic Blocks: Tangible Programming Elements for Preschoolers, In *Proceedings of Eighth IFIP TC.13 Conference On Human-Computer Interaction* (pp. 496 – 503), Amsterdam : IOS Press.

Yeh, M., & Wickens, C.D. (2001). Display signalling in augmented reality: effects of cue reliability and image realism on attention allocation and trust calibration. *Human Factors*, 43, 355-365.

Zhong, X., Liu, P., Georganas, N., & Boulanger, P. (2003). Designing a vision-based collaborative augmented reality application for industrial training. *IT-Information Technology*, 45, 7-18.

Zhou, Z., Cheok, A. D., Yang, X., & Qiu, Y. (2004). An experimental study on the role of software synthesized 3D sound in augmented reality environments. *Interacting with Computers*, 16, 989-1016.

Zuckerman O., Arida, S., & Resnick M. (2005). *Extending Tangible Interfaces for Education: Digital Montessori-inspired Manipulatives*. Paper presented at the *CHI 2005 Conference on Human Factors in Computing Systems*, Portland, Oregon, USA, April.